

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Исследование структурно-фазового состояния и физико-механических свойств защитных нанокompозитных покрытий системы Zr-Y-O на поверхности кремния

УДК 621.793-419.8

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
154Б62	Ван Синьсинь		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Божко И.А.	к.ф.-м.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кашук И.В.	к.т.н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД ШБИП	Сечин А.И.	д.т.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.03.01 Материаловедение и технологии материалов	Овечкин Б.Б.	к.т.н		

Томск – 2020 г.

*Планируемые результаты обучения по ООП 22.03.01*

Код результата	<b>Результат обучения</b>  (выпускник должен быть готов)
P1	Применять основные положения и методы гуманитарных наук при решении социально-общественных и профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов
P2	Использовать современное информационное пространство при решении профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов
P3	Разрабатывать, оформлять и использовать техническую документацию, включая нормативные документы по вопросам интеллектуальной собственности в области материаловедения и технологии материалов
P4	Проводить элементарный экономический анализ ресурсов, технологий и производств при решении профессиональных задач в области материаловедения и технологии материалов
P5	Эффективно работать в коллективе на основе принципов толерантности, использовать устную и письменную коммуникации на родном и иностранном языках в мультикультурной среде.
P6	Эффективно выполнять трудовые функции по реализации высокотехнологичных производств материалов и изделий
P7	Проводить комплексную диагностику материалов, процессов и изделий с использованием технических средств измерений, испытательного и производственного оборудования
P8	Готовность к мотивированному саморазвитию, самоорганизации и обучению для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности в области материаловедения и технологии материалов
P9	Успешно использовать методы и приемы организации труда, обеспечивающие эффективное, экологически, социально и технически безопасное производство
P10	Использовать принципы производственного менеджмента и управления персоналом в производственной деятельности в области материаловедения и технологии материалов

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
Направление подготовки (специальность) Материаловедение и технологии материалов  
Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП  
\_\_\_\_\_  
(Подпись)      (Дата) Овечкин Б.Б.

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работе
---------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
154Б62	Ван Синьсинь

Тема работы:

Исследование структурно-фазового состояния и физико-механических свойств защитных нанокompозитных покрытий системы Zr-Y-O на поверхности кремния	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ №59-87/с от 28.02.220

Срок сдачи студентом выполненной работы:	25.05.2020 г.
--	---------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Создание оптически прозрачного защитного покрытия системы Zr-Y-O на поверхности монокристаллического кремния, обладающие повышенной стойкостью к ударному воздействию высокоскоростных твердых микрочастиц Fe.
---------------------------------	--

<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	1. Анализ и систематизация литературных источников по теме исследования; 2. Исследование микроструктуры и фазового состава защитных покрытий системы Zr-Y-O методами рентгенофазового анализа и просвечивающей электронной микроскопии; 3. Оценка величины светопропускания образцов с защитными покрытиями системы Zr-Y-O в видимом диапазоне длин волн. 4. Определение микротвёрдости и трещиностойкости покрытий системы Zr-Y-O; 5. Исследование стойкости образцов Si с защитными покрытиями на основе Zr-Y-O к ударным воздействиям высокоскоростных твердых частиц железа; 6. Подготовка материалов для разделов «Социальная ответственность» и «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».
<b>Перечень графического материала</b>	График, схемы применяемых в работе
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> (с указанием разделов)	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент.	Кашук И.В. доцент ОСГН ШБИП
Социальная ответственность	Сечин А.И. профессор ООД ШБИП
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском языке</b>	
введение, литературный обзор, методика эксперимента, результаты и их обсуждение, финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение, социальная ответственность и заключение должны быть написаны на русском языке.	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	27.04.2020 г.
---	---------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Божко И.А.	к.ф.-м.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
154Б62	Ван Синьсинь		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»  
 Уровень образования бакалавр  
 Отделение школы (НОЦ) материаловедения  
 Период выполнения весенний семестр 2020 учебного года

Форма представления работы:

бакалаврская работа
---------------------

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	25.05.2020 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
20.04.2020	Социальная ответственность	15
23.04.2020	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
03.05.2020	Литературный обзор	15
05.05.2020	Методика эксперимента	30
25.05.2020	Результаты и их обсуждение	25

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Божко И.А.	к.ф.-м.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ ИШНПТ	Овечкин Б.Б.	к.т.н.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ  
И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО		
154Б62	Ван Синьсинь		
Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Анализ конкурентных технических решений (НИ)</i>	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. <i>Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)</i>	Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования
3. <i>Составление бюджета инженерного проекта (НИ)</i>	Расчет бюджетной стоимости НИ
4. <i>Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)</i>	Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.

**Перечень графического материала**

1. Оценка конкурентоспособности ИП
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Основные показатели эффективности НИ

**Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**

20.04.2020

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН ШБИП	Кашук Ирина Вадимовна	к.т.н		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
154Б62	Ван Синьсинь		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
154Б62	Ван Синьсинь

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	ОМ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

Тема ВКР:

**Исследование структурно-фазового состояния и физико-механических свойств защитных нанокompозитных покрытий системы ZrY-O на поверхности кремния**

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект: нанокompозитные покрытия на основе Zr-Y-O Область применения: защита поверхности космических аппаратов от ударного воздействия микрометеороидов.
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	Трудовой кодекс Российской Федерации ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов и обоснование мероприятий по снижению воздействия	1. Анализ показателей шума. 2. Анализ показателей микроклимата. 3. Анализ электробезопасности. 4. Анализ освещенности рабочей зоны. 5. Анализ пожарной безопасности.
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	Анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы). Анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы). Анализ воздействия объекта на литосферу (отходы).
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Чрезвычайные ситуации технического характера из-за сильного мороза.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	23.04.2020
--	------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор (ОКД, ИШНКБ)	Сечин Александр Иванович	Доктор технических наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
154Б62	Ван Синьсинь		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа «Исследование структурно-фазового состояния и физико-механических свойств защитных нанокompозитных покрытий системы Zr-Y-O на поверхности кремния» состоит из 89 страниц печатного текста, содержит 22 рисунков, 31 таблиц и 48 источника использованной литературы.

Ключевые слова: магнетронное осаждение, защитное покрытие, структурно-фазовое состояние, микротвердость, трещиностойкость, кратер плотность.

Объектом исследования являются покрытия на основе Zr-Y-O толщиной 3 и 6 мкм, осаждаемые на поверхность монокристаллического кремния с ориентацией [100].

Цель работы – исследование микроструктуры, фазового состава, физико-механических свойств композиционных покрытий системы Zr-Y-O толщиной 3 мкм и 6 мкм, полученных в условиях импульсного магнетронного осаждения, а также оценка их стойкости к ударному воздействию твердых микрочастиц Fe, скорость которых составляет 5-7 км/с.

В процессе работы были использованы следующие методы: методы рентгенофазового анализа, просвечивающей электронной микроскопии, сканирующей электронной микроскопии, спектрофотометрический метод, метод микроидентификации.

По данным РФА и ПЭМ установлено, что формируемые в условиях импульсного магнетронного осаждения защитные покрытия Zr-Y-O обладают мелкокристаллической столбчатой структурой, средний поперечный размер кристаллитов которых лежит в интервале от  $46 \pm 7$  нм до  $180 \pm 15$  нм. Исследование оптических свойств показало, что наибольший коэффициент светопропускания  $\sim 75$  % в видимой области спектра характерен для образцов с покрытием системы Zr-Y-O толщиной 3 мкм, в то время как коэффициент светопропускания образцов с покрытием Zr-Y-O толщиной 6 мкм не превышает 60 %. При оценке параметров механических свойств установлено, что



нанесение на поверхность образцов монокристаллического кремния защитных покрытий системы Zr-Y-O позволяет увеличить его микротвердость до 14 ГПа и трещиностойкость до  $2,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ . Результаты лабораторных ударных испытаний показали, что после нанесения защитных покрытий системы Zr-Y-O толщиной 3 мкм процесс эрозии поверхности кремния протекает менее интенсивно, так как данные покрытия позволяют уменьшить поверхностную плотность кратеров в 3.7 раза по сравнению с исходными образцами кремния. Защитные покрытия Zr-Y-O толщиной 6 мкм позволяют снизить поверхностную плотность кратеров относительно исходного кремния лишь в 2,7 раза, а также имеют тенденцию к отслаиванию их от кремниевой подложки в процессе их бомбардировки потоком твердых микрочастиц Fe.

### **Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки**

В настоящей работе применяют следующие сокращения и обозначения:

КА – Космические аппараты

КМ – Космический мусор

СБ – Солнечная батарея

HST – Космический телескоп «Хаббл»

PSZ – Частично стабилизированный  $ZrO_2$

TZP – Тетрагональный поликристаллический  $ZrO_2$

ZTA – Оксид алюминия, упрочненный частицами  $ZrO_2$

РФА – рентгенофазового анализа

ПЭМ – Просвечивающая электронная микроскопия

СЭМ – Сканирующая электронная микроскопия

ГОСТ – государственный стандарт (СССР)

ВКР – выпускная квалификационная работа

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ .....	14
1.1. Повреждение космических аппаратов при ударном воздействии микрометеороидов и способы их защиты .....	14
1.2 Особенности фазообразования и свойства соединений в системе Zr-Y-O .....	20
2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	25
2.1 Методика рентгенофазового анализа.....	26
2.2 Методика просвечивающей электронной микроскопии.....	27
2.4 Спектрофотометрический метод.....	29
2.5 Методика оценки параметров механических свойств .....	29
2.6 Ударные испытания .....	31
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.....	33
3.1. Микроструктура и фазовый состав нанокompозитных покрытий системы Zr-Y-O.....	33
3.2. Оптические и механические свойства нанокompозитных покрытий системы Zr-Y-O.....	42
3.3. Исследование стойкости нанокompозитных защитных покрытий к ударным нагрузкам .....	45
4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ .....	51
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	51
4.1.1 Анализ конкурентных технических решений .....	51
4.1.2 SWOT-анализ .....	53
4.2 Планирование научно-исследовательских работ .....	56
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	56
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения .....	57
4.2.3 Бюджет научно-технического исследования.....	60

4.3	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....	65
5	СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....	69
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	69
5.1.1	Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства .....	69
5.1.2	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя .....	70
5.2	Производственная безопасность .....	70
5.2.1	Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	71
5.3	Экологическая безопасность .....	79
5.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	80
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	83
	СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	85

## ВВЕДЕНИЕ

Необходимость проведения исследований высокоскоростных ударов была положена с началом полета человека в космос и остается актуальной до сих пор. Это обусловлено тем, что при длительных полетах космической техники существует проблема их метеоритной уязвимости. Столкновения с крупными высокоскоростными частицами в космосе могут приводить к значительным повреждениям различных элементов конструкции космических аппаратов (КА), а также к их полному разрушению. Частицы микронных размеров, называемые микрометеоритами, часто встречающиеся в космическом пространстве, редко приводят к большим повреждениям элементов конструкции КА, но могут вызывать медленную эрозию поверхности различных оптических элементов и солнечных батарей. Это, в свою очередь, приводит к ухудшению эксплуатационных свойств данных оптических элементов и постепенному снижению срока эксплуатации космических аппаратов. Следовательно, метеоритная опасность является одним из важных факторов, который необходимо обязательно учитывать при конструировании аппаратуры и различных элементов КА, находящихся длительное время в условиях космического пространства. Очевидно, что для исключения негативного воздействия микрометеоритов на оптические элементы КА требуется разработка и конструирование надежной противометеоритной защиты. В настоящее время уже существуют различные конструкции защитных экранов, применяемые для защиты корпуса КА от воздействия метеоритов. Но данный способ защиты не может быть использован для оптических элементов (иллюминаторов, солнечных батарей, зеркал и т.д.) КА, так как он не обеспечивает необходимо уровня пропускания для световых волн и не позволяет выполнять основные функции по проведению наблюдений, выполняемых в рамках различных космических экспериментов. Эту проблему может решить разработка и создание защиты на основе ударопрочных оптически прозрачных керамических покрытий.

# 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

## 1.1. Повреждение космических аппаратов при ударном воздействии микрометеороидов и способы их защиты

Столкновения космических аппаратов (КА) с метеорными телами естественного происхождения и продуктами антропогенного загрязнения космоса (космический мусор) относятся к числу важнейших факторов, вызывающих повреждения и разрушения КА [1, 2]. Метеорными телами или метеороидами считаются тела, движущиеся в Солнечной системе, поперечный размер которых варьируется от нескольких десятков метров до долей микрометра. Частицы, поперечный размер которых составляет менее 1 мм, называют микрометеорными частицами. В случае оценочных расчетов можно считать, что поток микрометеорных частиц в межпланетном пространстве имеет среднее значение плотности  $10^3\text{--}10^5 \text{ м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ . Следует отметить, что частицы размером менее 1 мкм достаточно эффективно удаляются из Солнечной системы за счет давления света. Размер обломков космического мусора (КМ) также варьируется в широких пределах: от микроскопических частиц твердого топлива до отработавших ракетных ускорителей, все еще находящихся на низкой околоземной орбите. В результате все космические аппараты на околоземной орбите подвержены высокоскоростным ударным воздействиям метеороидов и осколков космического мусора. Такие воздействия могут вызывать значительные повреждения важных для полета элементов конструкции КА, что, в свою очередь, может приводить к катастрофическому отказу функционирования космического аппарата в целом.

Для больших космических аппаратов и орбитальных станций, совершающих длительный полёт, вероятность подвергнуться негативному ударному воздействию высокоскоростных метеороидов достаточно высока. Так, поверхности КА Eureka, LDEF, Solar Max, PALAPA и др., возвращенных на Землю после нескольких лет пребывания в космосе, оказались испещренными множеством изъёмов, оставленных микрометеоритами и

частицами космического мусора (КМ). В наибольшей степени от ударов мелких частиц страдают различные оптические элементы: иллюминаторы, линзы, зеркала и т. д. Например, в качестве защиты полупроводниковых фотопреобразователей солнечных батарей (СБ) от радиационных воздействий космического пространства используют тонкие стеклянные пластины. Удар высокоскоростной микрочастицы о поверхность фотопреобразователей СБ вызывает механические и плазменные процессы, при которых на поверхности образуется кратер, а в результате распространения ударной волны происходят нарушение связей в слоистой структуре СБ. Кроме того, попадание высокоскоростных частиц на поверхность СБ опасно из-за возможности возникновения короткого замыкания. Процесс возникновения короткого замыкания связывают с тем, что в зоне распространения ударной волны в слоистой структуре СБ давление может достигать  $10^9$ - $10^{10}$  Па. При таких давлениях у диэлектрических и полупроводниковых материалов резко снижается удельное сопротивление, что способствует возникновению электрического пробоя СБ.

В работе [ 3 ] представлены результаты анализа воздействия микрометеоров и частиц космического мусора на покровные защитные стекла СБ КА: космический телескоп «Хаббл» (HST), космическая орбитальная станция «Мир», доставленных на Землю после эксплуатации их в течение 8-10 лет в космосе, которые позволяют понять механизм взаимодействия высокоскоростных микрочастиц ( $v \sim 1$ -72 км/с) со стеклами и другими хрупкими материалами, а также процесс образования стеклянных осколков и инъекции их в окружающую среду. В зоне удара высокоскоростных частиц о стекло возникает давление более 15 ГПа, стекло превращается в порошок, состоящий из микронных осколков. Объем осколков может в 100-1000 раз превышать объем ударяющей высокоскоростной частицы. На рис. 1.1 показаны кратеры, обнаруженные на поверхности СБ HST с обширными периферийными разрушениями стекла. Причем, эти разрушения расположены далеко за пределами отверстия [4].

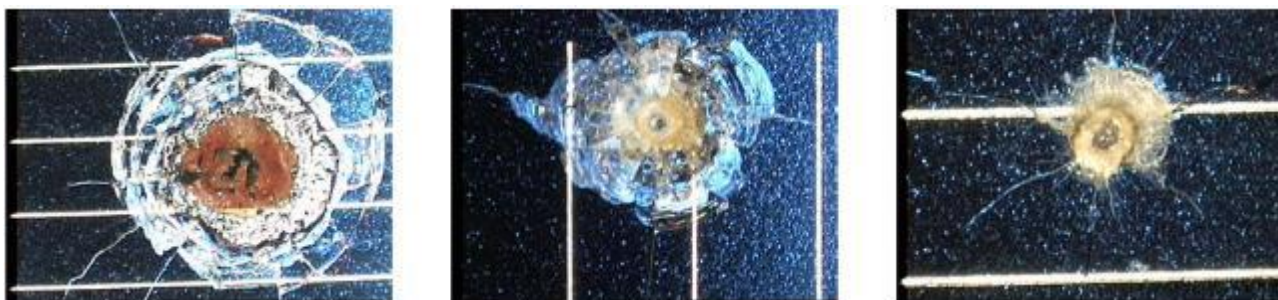


Рисунок 1.1 – Обширные периферийные разрушения стекла СБ НСТ. Диаметры кратеров слева направо 4, 2 и 0,6 мм

Анализ большого количества экспериментальных данных исследования повреждений, возникающих на поверхности оптических элементов КА при воздействии микрометеоров и частиц космического мусора, позволил сделать вывод, что в хрупких материалах, как правило, образуется центральное углубление, заполненное тонкоизмельченным материалом, с небольшими выступами по краям или без них (рис. 1.2). Вокруг центрального углубления образуется зона повреждений в виде кольцевых трещин, которая визуально напоминает раковину (раковистая зона). Данная зона заканчивается радиальными трещинами, которые распространяются от места удара на расстояния, превышающие диаметр кратера в 10 и более раз [5].

Для характеристики размеров кратера, формируемого при соударениях высокоскоростных частиц с поверхностью хрупких материалов, используют следующие виды диаметров (рис. 1.2) [4, 5]:  $D_p$  – диаметр, характеризующий размер центрального углубления;  $D_{\text{halo}}$  – диаметр зоны растрескивания, формируемой около центрального углубления;  $D_{\text{CO}}$  – диаметр зоны растрескивания или раковистой зоны, который совпадает с размером кольцевой трещины, наиболее удаленной от центрального углубления.



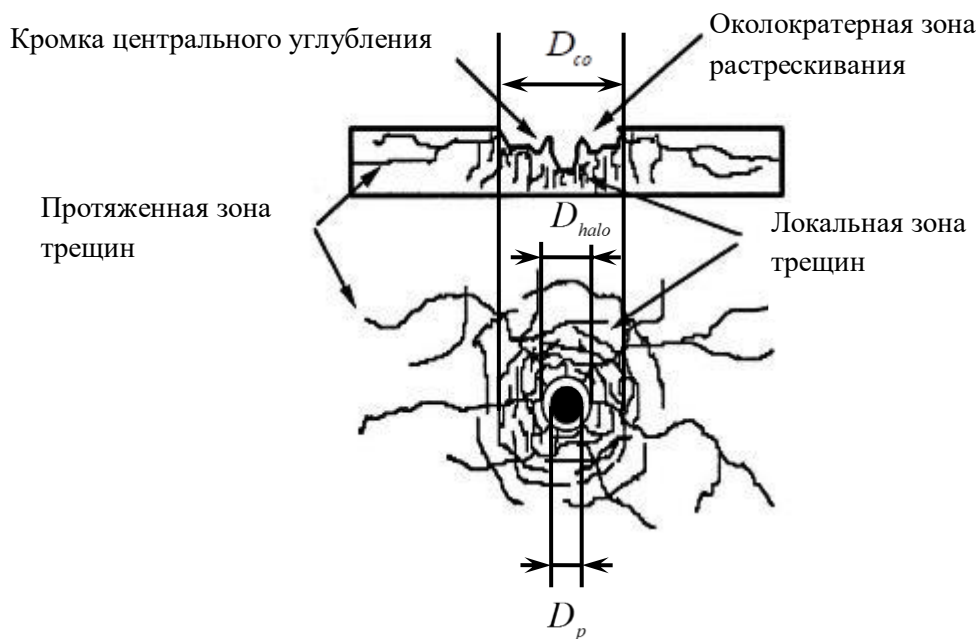


Рисунок 1.2 – Схема механических повреждений, возникающих в хрупкой мишени при высокоскоростном ударе, с обозначением диаметров для разных зон

В некоторых случаях для описания поперечных размеров кратера используются и другие параметры, например, диаметр, определяемый по максимальному разлету осколков, выброшенных из кратера. Однако этот параметр обычно мало отличается от значения  $D_{co}$ , измерение которого, как правило, производится более надежно.

Очевидно, что для обеспечения работоспособности космического аппарата (КА) в течение всего срока его активного существования требуется применение специальных способов защиты его поверхности от ударного воздействия высокоскоростных космических частиц. Традиционными способами защиты космических аппаратов на сегодняшний день являются использование конструкций, состоящих из нескольких экранов, которые расположены на некотором расстоянии относительно корпуса. Такая конструкция первоначально была предложена Випплом Ф.Л. (так называемая защита Виппла) [ 6 ], которая представляет собой два защитных экрана (рис. 1.3, а) с зазором между ними, расположенные над стенкой корпуса КА. Для данной конструкции за последние несколько десятилетий был проведен комплекс исследований, направленный на уменьшение угрозы повреждений поверхности КА при воздействии высокоскоростных микрометеороидов.

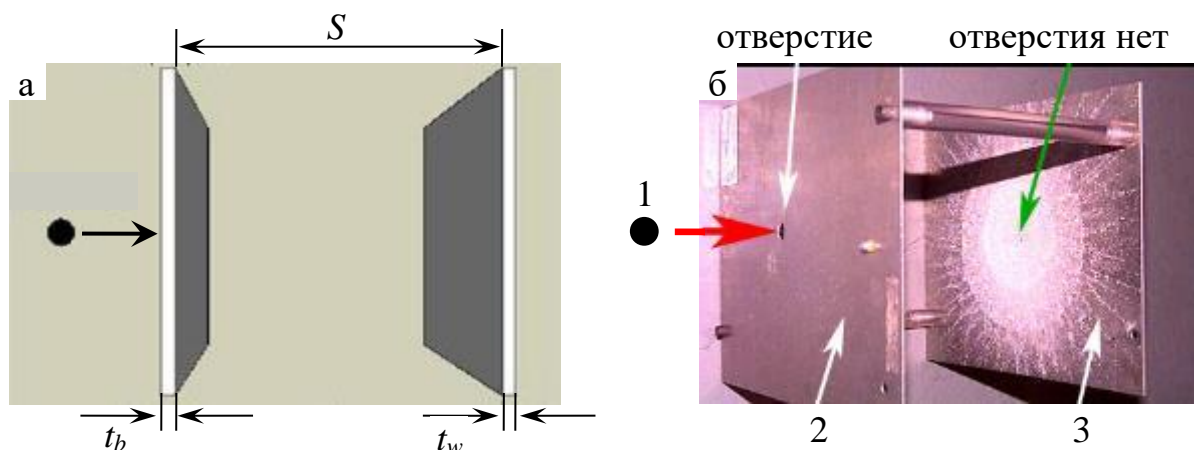


Рисунок 1.3 – Изображение защиты Виппла (1 – бомбардирующая частица; 2 – отбойная плита; 3 – задняя стенка): а – схематическое изображение; б – изображение, иллюстрирующее механизм защиты с двумя экранами

Результаты этих исследований показали, что по сравнению с эквивалентной одностенной конструкцией применение двухстенной конструкции с металлическим защитным экраном и прижимной стенкой позволяет повысить эффективность защиты корпуса КА от механических повреждений. Защитный эффект обеспечивается тем, что при высокоскоростном соударении бомбардирующей частицы даже с относительно тонким первым экраном она разрушается (рис. 1.3, б). В последствии на второй экран попадает расходящийся поток фрагментов раздробленной частицы и пробитого экрана, которые могут находиться в твердом, жидком и парообразном состоянии, что определяется скоростью их соударения с преградой. Ударное воздействие расходящегося потока значительно слабее по сравнению с локальным воздействием монолитной частицы. Если расходящийся поток все же пробивает второй экран, процесс фрагментации и расширения потока повторяется. Результаты дальнейших исследований [2] показали, что использование в многослойной конструкции защитных экранов композиционных материалов (например, армированный пластик Кевлар и эпоксидная смола) в сочетании с металлическими материалами (например, алюминием) позволяет защитить прижимную стенку от перфорации при высокоскоростных соударениях [2] .

Интересный вариант защиты КА от воздействия высокоскоростных метеороидных частиц и частиц космического мусора, который может быть использован в процессе длительных орбитальных полетов, представлен в работе [ 7 ]. Авторы этой работы в качестве защиты КА предложили использовать специальную конструкцию, основным элементом которой является прослойка из пористого материала, заполняемая водо-ледяной смесью. Создание данной защиты происходит после выведения космического аппарата на орбиту путем заполнения прослойки из пористого материала водой при температуре выше температуры замерзания воды. Для поддержания необходимой температуры в процессе заполнения пористой прослойки водой осуществляется с помощью встроенного нагревателя. После этого нагреватель отключается и вода, находящаяся в материале пористой прослойки замерзает. В результате вокруг корпуса КА после выхода его на орбиту формируется защитная ледяная конструкция. Авторы работы объяснили принципы работы данной защитной конструкции следующим образом. При соударении с ледяной защитной конструкцией энергия высокоскоростной частицы затрачивается на плавление льда и испарение воды. Процесс испарения воды является более энергоемким процессом. Поэтому теплоту, затрачиваемую на плавление льда, можно не учитывать. Температура кипения воды значительно ниже температуры испарения металлических материалов, широко используемых для изготовления защитных экранных конструкций. Поэтому основная часть энергии высокоскоростной частицы при проникновении ее в лед будет затрачена на испарение воды, которая образуется в процессе плавления льда.

На сегодняшний день разработано много различных вариантов многослойной экранной защиты для космических аппаратов с целью максимального снижения количества механических повреждений, возникающих при ударном воздействии высокоскоростных микрометеороидов. Однако рассмотренные выше способы защиты КА от ударного воздействия высокоскоростных микрометеороидов не могут быть применены для оптических элементов его конструкции. Это связано с тем, что оптические

элементы КА в процессе его полета должны обеспечивать соответствующий уровень пропускания и отражения электромагнитного излучения, а также обеспечивать работу различных оптических приборов при проведении визуальных наблюдений с минимальными помехами. С этой точки зрения большой интерес исследователей представляют разработка новых средств защиты в виде оптически прозрачных защитных покрытий.

## **1.2 Особенности фазообразования и свойства соединений в системе Zr-Y-O**

Диоксид циркония  $ZrO_2$ , который обладает ярко выраженными свойствами полиморфизма, занимает особое место среди керамических материалов. Керамические материалы на основе диоксида циркония обладают рядом особенных свойств, которые оказывают значительное влияние на эксплуатационные характеристики конечных изделий. Однако свойства керамических материалов на основе диоксида циркония зависят не только от химического состава, но и определяются их фазовым составом и микроструктурой.

В системе Zr-O в зависимости от термодинамических условий (температуры, давления, напряженного состояния и т.д.) диоксид циркония  $ZrO_2$  может существовать в одной из трех кристаллических модификаций – моноклинной M- $ZrO_2$ , тетрагональной T- $ZrO_2$  или кубической C- $ZrO_2$  (рис. 1.4). Кристаллическая структура различных модификаций представлена в таблице 1.1. Моноклинная фаза M- $ZrO_2$  является термодинамически устойчивой фазой, которая существует при комнатной температуре. Тетрагональная фаза T- $ZrO_2$  при комнатной температуре является метастабильной фазой, которая под действием механических напряжений или при повышении температуры способна спонтанно превращаться в моноклинную фазу M- $ZrO_2$ . Переход T- $ZrO_2$   $\Rightarrow$  C- $ZrO_2$  наблюдается при температурах выше 2370 °C. Сведения о кристаллической структуре и параметрах решетки различных модификаций диоксида циркония представлены в табл. 1.1 [8].

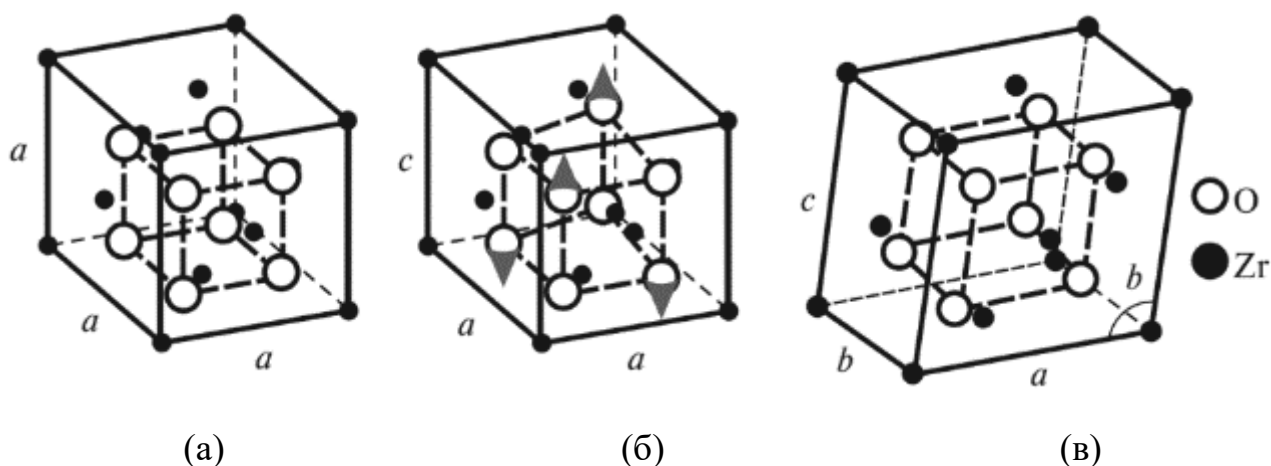


Рисунок 1.4 – Кристаллические модификации диоксида циркония [9]: а – кубическая модификация C-ZrO<sub>2</sub>; б – тетрагональная модификация T-ZrO<sub>2</sub>; в – моноклинная модификация M-ZrO<sub>2</sub>

Таблица 1.1 Кристаллическая структура соединений системы Zr-O [10]

Соединение	Символ Пирсона, простр. гр.	Параметры решетки, нм			Примечание
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
M-ZrO <sub>2</sub>	<i>mP12</i> , <i>P2<sub>1</sub>/c</i>	0.51505	0.52116	0.53173	β=99,230°
T-ZrO <sub>2</sub>	<i>tP6</i> , <i>P4<sub>2</sub>/nmc</i>	0.364	–	0.527	при 1250°C
C-ZrO <sub>2</sub>	<i>cF12</i> , <i>Fm<math>\bar{3}</math>m</i>	0.509	–	–	
ZrO <sub>2</sub> *	–, <i>Pbcm</i>	0,5007	0,5227	0,5058	При 600°C и 6 ГПа

Примечание. \* Фаза высокого давления

В настоящий момент известно несколько способов для управления фазовым составом материалов на основе диоксида циркония. Одним из основных способов такого управления является легирование диоксида циркония оксидами гетеровалентных металлов и определенная термическая обработка. Известно, что диоксид циркония с многими двух-, трех- и четырехвалентными оксидами может образовывать твердые растворы по типу

замещения. Общим и очень важным свойством указанных растворов является подавление обратимых полиморфных превращений вида  $M\text{-ZrO}_2 \leftrightarrow T\text{-ZrO}_2$ , характерного для чистого диоксида циркония. Процесс подавления обратимых фазовых превращений называется стабилизацией. Общеизвестным стабилизатором тетрагональной фазы  $T\text{-ZrO}_2$  при комнатной температуре является оксид иттрия, в котором сочетается наличие трехвалентного катиона  $Y^{3+}$  и близость его радиуса ( $1,06 \text{ \AA}$ ) с радиусом  $Zr^{4+}$  ( $0,87 \text{ \AA}$ ). Кроме того, введение  $Y_2O_3$  позволяет значительно расширить область гомогенности твердого раствора на основе тетрагональной фазы.

Наиболее полезные механические свойства материалов наблюдаются в тех случаях, когда диоксид циркония находится в метастабильном многофазном состоянии. Причиной этого является так называемое трансформационное упрочнение, наблюдаемое для циркониевой керамики. Реализация трансформационного упрочнения возможна благодаря контролируемому фазовому переходу  $T\text{-ZrO}_2 \Rightarrow M\text{-ZrO}_2$ , основанного на явлении полиморфизма  $ZrO_2$  и возможности стабилизации тетрагональной и кубической модификаций диоксида циркония. Дело в том, что при фазовом переходе  $T\text{-ZrO}_2 \Rightarrow M\text{-ZrO}_2$  происходит превращение тетрагональной кристаллической решетки в моноклинную, что сопровождается увеличением удельного объема отдельных фаз и возникновением сжимающих механических напряжений. Величина сжимающих механических напряжений настолько велика, что благодаря им становится возможным блокировать распространение трещин в материале, возникающих при его нагружении. В результате прочность керамики увеличивается, в чем и заключается эффект трансформационного упрочнения. Таким образом, фазовое превращение препятствует появлению трещин, способствует повышению ударной вязкости и снижению хрупкости циркониевых керамических материалов.

Диоксид циркония, содержащий преимущественно стабилизированную тетрагональную фазу, характеризуется комплексом уникальных механических свойств, среди которых: твердость, изгибная прочность и трещиностойкость

(вязкость разрушения). В таблице 1.2 приведены сведения для тетрагонального диоксида циркония в сравнении с другими керамическими материалами [11]. Из представленных данных видно, что тетрагональный диоксид циркония характеризуется более высокой прочностью на сжатие и изгиб по сравнению с альтернативными керамическими материалами. Также очевидно, что механизм трансформационного упрочнения позволяет получать материалы на основе  $ZrO_2$ , вязкость разрушения которых по величине значительно превосходит традиционные керамические материалы [12, 13]. В частности, трещиностойкость циркониевых керамических материалов может достигать до  $17 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ , тогда как трещиностойкость керамических материалов на основе  $Al_2O_3$  составляет около  $3,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ .

Таблица 1.2 – Механические свойства керамических материалов

Свойство		$Al_2O_3$	Mg-PSZ	Y-TZP	ZTA 80% $Al_2O_3$ 20% $ZrO_2$	Сплав Co—Cr
Прочность, МПа	На растяжение	250—300	300—400	—	—	600—1800
	На сжатие	2000—3000	2000—3000	3000—4000	—	—
	На изгиб	300—500	600—700	1000—1500	700—1000	—
Трещиностойкость, $\text{МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$		4—5	6—10	4—14	6—10	50—100
Модуль Юнга		400—450	200—250	200—250	300—350	210—250
Твердость по Виккерсу, ГПа		14—16	10—12	12—14	12—15	3—4

Примечание. PSZ — частично стабилизированный  $ZrO_2$ ; TZP — тетрагональный поликристаллический  $ZrO_2$ ; ZTA — оксид алюминия, упрочненный частицами  $ZrO_2$

Вышеуказанные свойства диоксида циркония позволяют рассматривать его как один из перспективных материалов, который может быть использован для создания ударопрочных защитных материалов. Однако для подтверждения данного утверждения требуется проведения специальных ударных испытаний для  $ZrO_2$ , суть которых заключается в ускорении твердых микрочастиц металлических материалов с помощью специальных испытательных стендов с последующей оценкой размеров механических повреждений, формируемых на поверхности исследуемых материалов. Полученные результаты ударных испытаний позволят сделать прогноз по возможности использования материалов на основе диоксида циркония в качестве ударопрочных защитных материалов, что по своей сути в настоящем времени является новым и актуальным. В связи с этим целью данной работы являлось исследование микроструктуры, фазового состава, физико-механических свойств композиционных покрытий системы Zr-Y-O толщиной 3 мкм и 6 мкм, полученных в условиях импульсного магнетронного осаждения, а также оценка их стойкости к ударному воздействию твердых микрочастиц Fe, скорость которых составляет 5-7 км/с.



## 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования в данной работе выступали защитные покрытия системы Zr-Y-O (табл. 2.1), которые были получены методом импульсного магнетронного осаждения с помощью вакуумной установки УВН-05МД «КВАНТ» [ 14 ]. Питание магнетрона осуществлялось от импульсного биполярного источника питания частотой 50 кГц, мощность магнетрона достигала 1,2 кВт. Для получения покрытий на основе Zr-Y-O использовали мозаичную мишень на основе циркония с определенным количеством вставок иттрия, которую распыляли в смеси газов O<sub>2</sub> и Ar, отношение парциальных давлений которых в вакуумной камере установки составляло 1:3: парциальное давление кислорода в камере P<sub>O<sub>2</sub></sub> = 0,075 Па; общее давление газовой смеси P<sub>общ.</sub> = 0,25 Па. Покрытия осаждали на образцы монокристаллического кремния марки КДБ-7,5-20 n-типа с кристаллографической ориентацией [100], которые представляли собой диски диаметром 15 мм и толщиной 4,5 мм. Температура подложки из кремния при осаждении защитных покрытий составляла 280±10°C, которая измерялась с помощью хромель-алюмелевой термопары. После осаждения покрытия образцы выдерживали в вакуумной камере в течение 40–60 мин, чтобы снизить его температуру до 90°C. Затем воздух вводили в камеру и выгружали полученные образцы. По данным гравиметрического метода было установлено, что полученные покрытия имеют толщину  $3 \pm 0,5$  мкм и  $6 \pm 0,5$  мкм. Адгезионная прочность полученных покрытий системы Zr-Y-O к подложке монокристаллического кремния составляла  $22 \pm 0.3$  Н (при h=3 мкм) и  $20 \pm 0.3$  Н (при h=6 мкм).

Таблица 2.1 – Объекты исследования

Образец	Подложка	Температура подложки, °C	Время напыления, мин.	Толщина покрытий, мкм	Адгезионная прочность, Н
ZrYO-3	m-Si [100]	280±10	130	$3 \pm 0,5$	$22 \pm 0.3$ Н
ZrYO-6			260	$6 \pm 0,5$	$20 \pm 0.3$ Н

## 2.1 Методика рентгенофазового анализа

Изучение фазового состава исследуемых покрытий осуществляли методом рентгеновской дифрактометрии [15] на дифрактометре «ДРОН-7» (Буревестник, Россия). Съемка дифракционного спектра покрытий проводилась при непрерывном  $2\theta$ -сканировании с фокусировкой по Брэггу-Брентано в излучении кобальтового анода (длина волны излучения  $\text{CoK}\alpha$   $\lambda = 1,78897 \text{ \AA}$ ). Съемка велась с полированной поверхности с шагом  $0.05^\circ$ , время экспозиции составляло 10 секунд. Профильный анализ и количественная обработка дифрактограмм были выполнены с использованием программного пакета *Repex*. Для описания профиля линий использовали функцию Лоренца. Интерпретация дифрактограмм проводилась с использованием базы порошковых дифрактометрических данных PDF2 (Powder Diffraction File) картотеки ICDD.

Расчет объемного соотношения кристаллических модификаций диоксида циркония в покрытии проводили по уравнению [16]:

$$V_m = \frac{I_m(\bar{1}11) + I_m(111)}{I_m(\bar{1}11) + I_m(111) + I_t(111)} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

$$V_t = 100 - V_m, \quad (2.2)$$

где  $V_m$  и  $V_t$  – объемные доли моноклинной ( $M\text{-ZrO}_2$ ) и тетрагональной ( $T\text{-ZrO}_2$ ) фаз диоксида циркония, соответственно.

$I_m(hkl)$  – интегральная интенсивность рефлексов ( $hkl$ ) моноклинной фазы диоксида циркония;

$I_t(hkl)$  – интегральная интенсивность рефлексов тетрагональной фазы диоксида циркония

Для оценки параметров тонкой кристаллической структуры исследуемых покрытий проводился анализ профилей дифракционных пиков: по уширению дифракционных линий определяли вклады, связанные с размерами областей когерентного рассеяния ( $D_{\text{ОКР}}$ ) и микронапряжениями  $\varepsilon$

(напряжениями второго рода  $\sigma_{II}$ ). Для определения напряжений второго рода использовали метод Уильямсона-Холла [17], согласно которому:

$$\frac{\beta \cos \theta}{\lambda} = \frac{K}{D_{\text{ОКР}}} + 4\varepsilon \frac{\sin \theta}{\lambda}, \quad (2.3)$$

где  $\beta$  – величина физического уширения дифракционной линии исследуемого образца,  $\theta$  – брегговский угол,  $K$  – постоянная Шеррера (принимая, что  $K=1$ ),  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения.

Оценку величины физического уширения  $\beta$  осуществляли по формуле:

$$\beta = \beta_{\text{exp}} - \beta_0, \quad (2.4)$$

где  $\beta_{\text{exp}}$  – ширина дифракционных линий на дифрактограмме исследуемого образца (ширина линии на полувысоте дифракционного пика),  $\beta_0$  – величина инструментального уширения. Величина инструментального уширения дифракционных линий  $\beta_0$  была определена по дифрактограмме эталона.

## 2.2 Методика просвечивающей электронной микроскопии

Для исследования микроструктуры и фазового состава исследуемых защитных покрытий использовали метод просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) [18]. Данный метод заключается в анализе специально приготовленных тонких фольг с помощью проходящего пучка электронов, генерируемого в колонне просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100F (JEOL, Япония) при ускоряющем напряжении 200 кВ. Данные исследования были проведены на базе центра коллективного пользования «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН. Для проведения исследований методом просвечивающей электронной микроскопии требуется приготовление тонких фольг, состоящее из следующих основных этапов:

1. Вырезка заготовок из кремниевой пластины с защитным покрытием (рис. 2.1) в количестве 6 шт. (размер одной заготовки – Д/Ш/В = 0,9 мм/4 мм/1,5 мм);

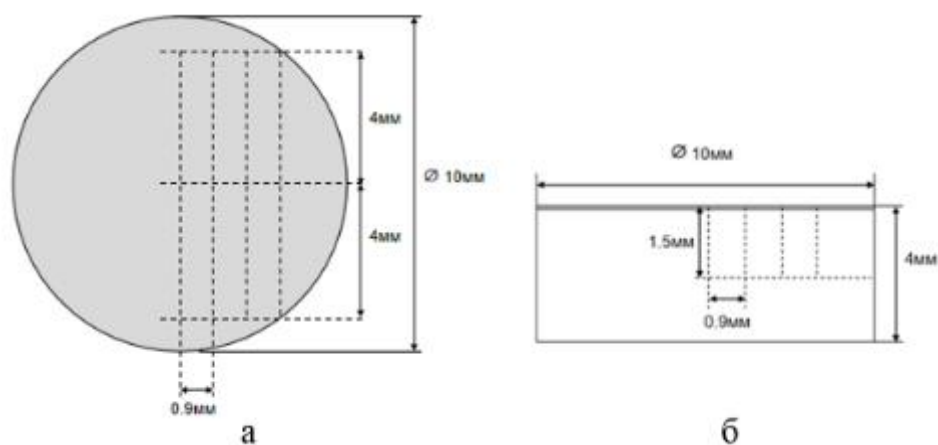


Рисунок 2.1 – Схематическое изображение вырезки заготовок из исследуемых образцов: а – вид сверху; б – поперечное сечение.

2. Шлифование заготовок с целью их утонения, в результате которого три образца имели размеры Д/Ш/В = 0,4 мм/4 мм/0,15 мм (рис. 2.2), другие три образца – Д/Ш/В = 1,2 мм/4 мм/0,15 мм;

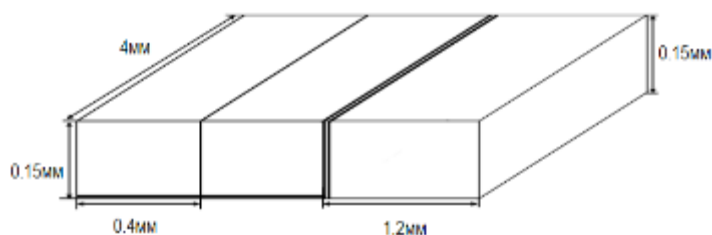


Рисунок 2.2 – Полученные образцы (размер двух образцов - Д/Ш/В = 0,4мм/4мм/0,15мм, одного - Д/Ш/В = 1,2мм/4мм/0,15мм)

3. Ионное утонение заготовок на установке «JEOL Ion Slicer» и финишная подготовка фольги для просвечивающей электронной микроскопии.

Анализ микродифракционных картин, полученных с помощью просвечивающего электронного микроскопа, осуществлялся путем измерения диаметров присутствующих кольцевых рефлексов. Межплоскостное расстояние рассчитывали по формуле:

$$d_{hkl} = 2\lambda L / D, \quad (2.5)$$

где  $D$  – диаметр кольцевого рефлекса (расстояние центрального рефлекса до других рефлексов),  $\lambda L$  – дифракционная постоянная электронного микроскопа ( $\lambda$  – длина волны электронов,  $L$  – дифракционная длина камеры),  $d_{hkl}$  – межплоскостное расстояние семейства плоскостей  $hkl$ .

Для определения среднего размера зерен на фотографию микроструктуры было нанесено не менее 10 секущих линий и подсчитано число пересечений секущих с границами зерен. Средний условный размер кристаллитов ( $d_{ср}$ ) определяется по формуле (2.6):

$$d_{ср} = L/N, \quad (2.6)$$

где  $L$  – суммарная длина всех отрезков;  $N$  – общее число пересечений секущих с границами зерен.

## 2.4 Спектрофотометрический метод

Анализ оптических свойств покрытий основывался на измерениях коэффициента пропускания  $T = f(\lambda)$  в диапазоне длин волн света  $\lambda = 200\text{--}800$  нм. При этом спектральное разрешение по длинам волн обычно составляло 1 нм, а точность по абсолютному пропусканию 0,1 %.

Измерения спектров светопропускания исследуемых образцов выполнены при комнатной температуре на двухлучевом спектрофотометре СФ-256 УВИ (ЛОМО Фотоника, Россия). В основу работы данного спектрофотометра положен принцип измерения соотношения двух световых потоков, прошедших сквозь исследуемый образец и сквозь контрольный образец соответственно. В качестве контрольного образца был использован образец стекла марки К8. Зондирующее излучение направлялось перпендикулярно образцу.

## 2.5 Методика оценки параметров механических свойств

Для оценки механических свойств образцов монокристаллического кремния с защитными покрытиями Zr-Y-O определяли микротвердость и трещиностойкость исследуемых образцов, используя метод

микроиндентирования [ 19 , 20 ] их поверхности стандартной алмазной пирамидой Виккерса на микротвердоме DM8 (фирмы Affri, Италия). Отпечатки наносили при нагрузках 1–5 Н. Величина нагрузки выбиралась таким образом, чтобы на поверхности исследуемых образцов возникали радиальные трещины, исходящие из вершин отпечатка (рис. 2.3). С целью получения достоверного результата для каждого образца при данной нагрузке наносили не менее 10 отпечатков и за окончательный результат принималось среднее арифметическое значение.

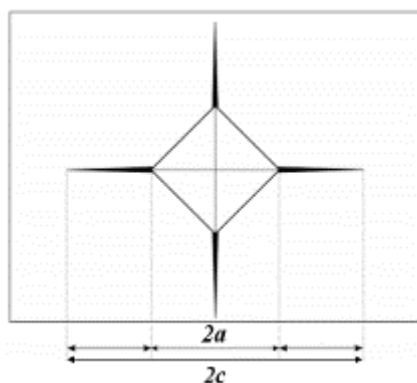


Рисунок 2.3 – Отпечаток от индентора с трещинами,  $a$  – полуширина отпечатка,  $c$  – половина длины трещины, измеренная от центра отпечатка.

Микротвердость исследуемых образцов рассчитывали по формуле:

$$H_v = 1,854 \frac{F}{d^2}, \quad (2.7)$$

где  $H_v$  – микротвердость по Виккерсу,  $F$  – нагрузка на индентор,  $d$  – средняя длина диагонали формируемого отпечатка.

В качестве меры трещиностойкости покрытий использовали критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_{IC}$ , рассчитанный по формуле [21]:

$$K_{IC} = \alpha \cdot \left( \frac{E}{H_v} \right)^{1/2} \cdot \frac{P}{c^{3/2}}, \quad (2.8)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от формы индентора (для пирамидки Виккерса  $\alpha = 0,016$ )  $E$  – модуль упругости,  $H_v$  – твердость по Виккерсу,  $P$  – нагрузка,  $c$  – длина радиальной трещины от центра отпечатка.

## 2.6 Ударные испытания

Для оценки способности образцов кремния с защитными покрытиями на основе Zr-Y-O противостоять ударному воздействию при бомбардировки их высокоскоростными твердыми частицами была использована легкогазовая пушка МПХ23/8 (рисунок 2.4) [22], разработанная в научно-исследовательском институте прикладной математики и механики Томского государственного университета [23]. Пушка состоит из вакуумной камеры, цилиндра и устройства для ускорения поршня. В вакуумной камере находится стол-держатель для исследуемых образцов, в центре которого имеется отверстие диаметром 50 мм для отсекаания более крупных осколков, которые могут образовываться при разрушении лепестков диафрагмы. На предметном столе-держателе размещались исследуемые образцы в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.5. Для ударных испытаний на столе-держателе закрепляли экспериментальные образцы диаметром 15 мм в количестве 8 штук, которые располагались равномерно вдоль окружности диаметром 115 мм. При этом 4 образца представляли собой исходный кремний (без покрытия), а другие 4 образца – образцы кремния с защитным покрытием на основе Zr-Y-O, расположенные в чередующемся порядке.



Рисунок 2.4 – Общий вид легкогазовой пушки МПХ23/8

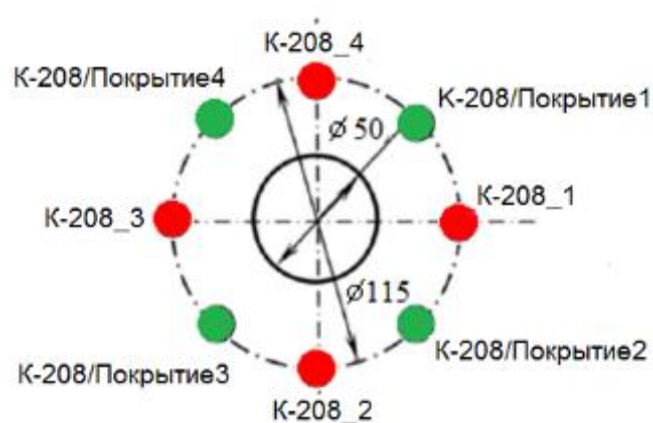


Рисунок 2.5 – Схема расположения образцов на столе-держателе

Для моделирования процесса воздействия микрометеороидов на поверхность космического корабля в лабораторных условиях использовались сферические микрочастицы Fe со средним диаметром  $56 \pm 8,2$  мкм, как показано на рис. 2.6. Одна порция порошка Fe, используемая для каждого выстрела, имела массу  $60,0 \pm 0,1$  мг. Скорость бомбардировки частиц железа в ходе испытаний составляла от 5–7 км/с. Подробное описание методики определения скорости бомбардируемых частиц железа представлено в работе [24].

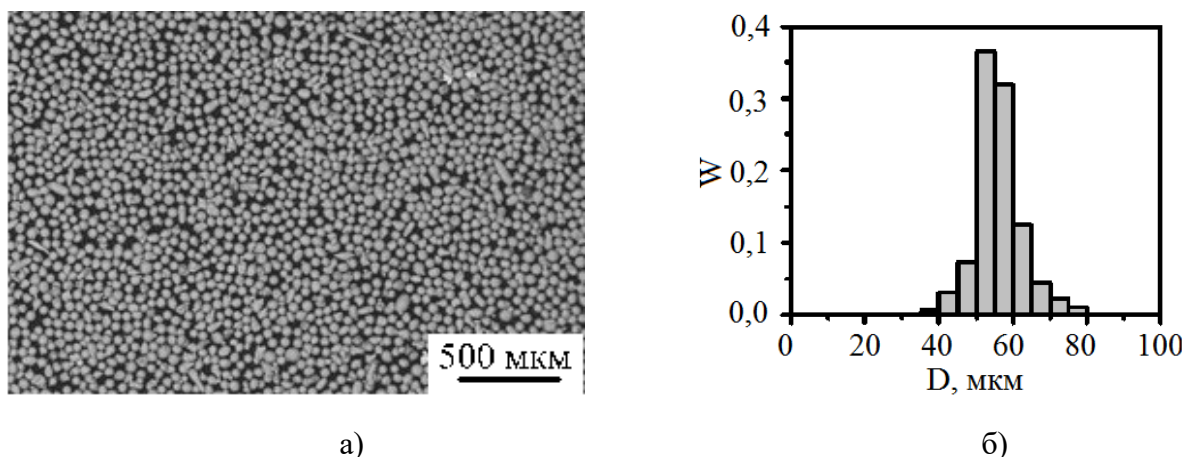


Рисунок 2.6 – РЭМ-изображение частиц порошка железа (а) и распределение частиц порошка Fe (б) по размерам

После проведения ударных испытаний, регистрировали изображения кратеров, сформированных на поверхности исследуемых образцов с помощью растрового электронного микроскопа LEO EVO-50XVP (Carl Zeiss, Германия), размещенного в ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН. Затем по СЭМ-изображениям измерялись диаметры и количество кратеров, сформированных на выбранном участке площадью  $80 \text{ мм}^2$ , и затем строились графики, иллюстрирующие распределения кратеров по размерам.

Для оценки способности защитных покрытий противостоять ударному воздействию твердых микрочастиц Fe рассчитывали относительную поверхностную плотность кратеров по формуле:

$$\rho_{\text{отн}} = \frac{\rho_0}{\rho}, \quad (2.9)$$

где  $\rho$  – поверхностная плотность кратеров на кремниях с покрытиями;  $\rho_0$  – поверхностная плотность кратеров на исходных кремниях (без покрытия)



## **4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

Основная цель данного раздела – оценить перспективность развития и планировать финансовую и коммерческую ценность конечного продукта, представленного в рамках исследовательской программы. Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на следующие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, каков бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала разработки.
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Цель данной ВКР – разработка технологии получения методом импульсного магнетронного осаждения композиционных защитных покрытий систем Zr-Y-O толщиной от 3 до 6 мкм на поверхности монокристаллического кремния и оценка их стойкости к ударным нагрузкам при взаимодействии с высокоскоростными твердыми микрочастицами Fe.

### **4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

#### **4.1.1 Анализ конкурентных технических решений**

В ходе исследования были рассмотрены две конкурирующие разработки о покрытиях различного состава:

1) Просветляющие покрытия на основе CVD алмаза для германиевой ИК-оптики;

2) Композиционные материалы на основе ZrC-BN, структура и свойства.

Детальный анализ необходим, т.к. каждый тип покрытия имеет свои достоинства и недостатки. В таблице 4.1 показано сравнение разработок-конкурентов и разработки данного НИ с точки зрения технических и экономических критериев оценки эффективности.

Таблица 4.1 – Сравнение конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Актуальность исследования	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
2. Трещиностойкость	0,14	5	2	3	0,7	0,28	0,42
3. Ударопрочность	0,18	4	3	3	0,72	0,54	0,54
4. Стабильность соединения с подложкой	0,14	4	4	3	0,56	0,56	0,42
5. Простота изготовления	0,05	3	5	4	0,15	0,25	0,2
6. Эффективность работы	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
7. Безопасность	0,08	4	4	4	0,32	0,32	0,32
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Цена сырья	0,12	4	5	3	0,48	0,6	0,36
2. Предполагаемый срок эксплуатации	0,06	4	3	4	0,24	0,18	0,24
3. Финансирование научной разработки конкурентных товаров и разработок	0,08	5	4	4	0,4	0,32	0,32
Итого	1	43	38	37	4,32	3,6	3,47

Расчет конкурентоспособности, на примере стабильности срабатывания, определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i = 0,1 \cdot 3 = 0,3,$$

где  $K$  – конкурентоспособность проекта;  $B_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $B_i$  – балл показателя.

Проведенный анализ конкурентных технических решений показал, что исследование в данной ВКР является наиболее актуальным и перспективным, имеет конкурентоспособность.

#### 4.1.2 SWOT-анализ

Для исследования внешней и внутренней среды проекта, в этой работе проведен SWOT-анализ с детальной оценкой сильных и слабых сторон исследовательского проекта, а также его возможностей и угроз.

Первый этап, составляется матрица SWOT, в которую описаны слабые и сильные стороны проекта и выявленные возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Матрица SWOT-анализа

<b>Сильные стороны</b>	<b>Слабые стороны</b>
С1. Низкая цена исходного сырья.	Сл1. Отсутствие ссылок и материалов для соответствующих научных исследований.
С2. Высокая трещиностойкость и ударопрочность продукции.	Сл2. Долгое время подготовки образца, используемого при проведении научного исследования.
С3. Более свежая информация, которая была использована для разработки проекта.	Сл3. Высокие требования к экспериментальному оборудованию.
С4. Экологичность технологии.	Сл4. Эксперименты имеют большие погрешности и неопределенности.
С5. Квалифицированный персонал.	Сл5. Вероятность получения брака.
<b>Возможности</b>	<b>Угрозы</b>
В1. Использование оборудования ИНШПТ ТПУ и ИФПМ СО РАН.	У1. Снижение стоимости разработок конкурентов.
В2. Появление потенциального спроса на новые разработки.	У2. Появление зарубежных аналогов и более ранний их выход на рынок.
В3. Внедрение технологии в аэрокосмической области.	
В4. Внедрение на мировой рынок, экспорт за рубеж.	

На втором этапе на основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации. Соотношения параметров представлены в таблицах 4.3–4.6.

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	-	-	-	-	-
	B2	-	+	+	-	-
	B3	-	+	-	+	-
	B4	+	+	-	-	-

Таблица 4.4 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	B1	-	-	+	+	+
	B2	-	-	-	-	-
	B3	-	-	-	-	-
	B4	-	-	-	-	-

Таблица 4.5 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	-	+	-	-	-
	У2	-	+	-	-	-

Таблица 4.6 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта						
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	У1	-	-	-	+	+
	У2	-	-	-	-	-

Результаты анализа представлены в итоговую таблицу 4.7.

Таблица 4.7 – Итоговая таблица SWOT-анализа

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта	Слабые стороны научно-исследовательского проекта
	<p>C1. Низкая цена исходного сырья.</p> <p>C2. Высокая трещиностойкость и ударопрочность продукции.</p> <p>C3. Более свежая информация, которая была использована для разработки проекта.</p> <p>C4. Экологичность технологии</p> <p>C5. Квалифицированный персонал.</p>	<p>Сл1. Отсутствие ссылок и материалов для соответствующих научных исследований.</p> <p>Сл2. Долгое время подготовки образца, используемого при проведении научного исследования.</p> <p>Сл3. Высокие требования к экспериментальному оборудованию.</p> <p>Сл4. Эксперименты имеют большие погрешности и</p>

		неопределенности. Сл5. Вероятность получения брака.
<b>Возможности</b> В1. Использование оборудования ИНШПТ ТПУ и ИФПМ СО РАН. В2. Появление потенциального спроса на новые разработки. В3. Внедрение технологии в аэрокосмической области В4. Внедрение на мировой рынок, экспорт за рубеж.	<b>Направления развития</b> В2С2С3. Высокая трещиностойкость и ударопрочность продукции позволяет расширить спрос, использование новейшей информации и технологий соответствует потенциальному спросу на новые разработки. В3С2С4. Высокая трещиностойкость и ударопрочность продукции и экологичность технологии являются хорошим основанием для внедрения технологии в аэрокосмической области. В4С1С2. Низкая цена исходного сырья и высокая трещиностойкость и ударопрочность продукции являются основой для экспорта за рубеж и выхода на мировой рынок.	<b>Сдерживающие факторы</b> В1Сл3Сл4Сл5. Использование новейшего оборудования для удовлетворения требований исследований, также может уменьшить экспериментальную ошибку и предотвратить появление брака.
<b>Угрозы</b> У1. Снижение стоимости разработок конкурентов. У2. Появление зарубежных аналогов и более ранний их выход на рынок.	<b>Угрозы развития</b> У1С2. Несмотря на снижение стоимости разработок конкурентов, наши продукты имеют лучшие механические свойства, больше перспектив развития. У2С2. Наши продукты обладают лучшими механическими свойствами, являются более привлекательными мировом рынке.	<b>Уязвимости:</b> У1Сл4Сл5. Введение систем совершенствования производственных процессов для снижения погрешности и неопределенности.

В результате SWOT-анализа показано, что на преимущества разрабатываемой технологии преобладают над ее недостатками. Данные недостатки, которые на данный момент на практике не устранены, но в теории уже есть возможности для их устранения. Результаты анализа учтены в дальнейшей научно-исследовательской разработке.

## 4.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса научно-исследовательских работ осуществляется в порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение количества исполнителей для каждой из работ;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления.

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Порядок этапов работ и распределение исполнителей для данной научно-исследовательской работы, приведен в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Научный руководитель
	2	Календарное планирование выполнения ВКР	Инженер, научный руководитель
Выбор способа решения поставленной задачи	3	Обзор научной литературы	Инженер
	4	Выбор методов исследования	Инженер
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Планирование эксперимента	Инженер, научный руководитель
	6	Подготовка образцов для эксперимента	Инженер
	7	Проведение эксперимента	Инженер
Обобщение и оценка результатов	8	Обработка полученных данных	Инженер
	9	Оценка правильности полученных результатов	Инженер, Научный руководитель
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	10	Составление пояснительной записки	Инженер

#### 4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

При проведении научных исследований основную часть стоимости разработки составляют трудовые затраты, поэтому определение трудоемкости проводимых работ является важным этапом составления сметы.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости использована следующая формула:  $K_{lc}$

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (4.1)$$

где  $t_{ожі}$  — ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, человеко-дни;

$t_{\min i}$  — минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, человеко-дни;

$t_{\max i}$  — максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, человеко-дни.

Зная величину ожидаемой трудоемкости, можно определить продолжительность каждой  $i$ -ой работы в рабочих днях  $T_{pi}$ , при этом учитывается параллельность выполнения работ разными исполнителями. Данный расчёт позволяет определить величину заработной платы.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (4.2)$$

где  $T_{pi}$  — продолжительность одной работы, рабочие дни;

$t_{ожі}$  — ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, человеко-дни;

$Ч_i$  — численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни, необходимо воспользоваться формулой (4.3):

$$T_{к.лнж} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (4.3)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$  – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{\text{кал.инж}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48 \quad (4.4)$$

где  $T_{\text{кал}}$  – общее количество календарных дней в году;  $T_{\text{вых}}$  – общее количество выходных дней в году;  $T_{\text{пр}}$  – общее количество праздничных дней в году.

Расчеты временных показателей проведения научного исследования обобщены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$
	$t_{\min}$ , чел-дни		$t_{\max}$ , чел-дни		$t_{\text{ожг}}$ , чел-дни			
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	2	-	4	-	2,8	-	2,8	4
2. Календарное планирование выполнения ВКР	1	3	3	4	1,8	3,4	2,6	4
3. Обзор научной литературы	-	6	-	10	-	7,6	7,6	11
4. Выбор методов исследования	-	3	-	5	-	3,8	3,8	6
5. Планирование эксперимента	2	6	4	8	2,8	6,8	4,8	7
6. Подготовка образцов для эксперимента	-	5	-	7	-	5,8	5,8	9
7. Проведение эксперимента	-	15	-	20	-	17	17	25
















8. Обработка полученных данных	-	10	-	15	-	12	12	18
9. Оценка правильности полученных результатов	2	3	4	5	2,8	3,8	3,3	5
10. Составление пояснительной записки		8		10	-	8,8	8,8	13
Итого:	7	59	15	84	10,2	69	68,5	102

*Примечание:* Исп. 1 – научный руководитель, Исп. 2 – инженер.


На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп	$T_{ki}$ , кал. дн.	Продолжительность работ											
				февр			март			апр			май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Исп1	4												
2	Календарное планирование выполнения ВКР	Исп1 Исп2	4	 											
3	Обзор научной литературы	Исп2	11												
4	Выбор методов исследования	Исп2	6												
5	Планирование эксперимента	Исп1 Исп2	7			 									
6	Подготовка образцов для эксперимента	Исп2	9												
7	Проведение эксперимента	Исп2	25												
8	Обработка полученных данных	Исп2	18												
9	Оценка правильности полученных результатов	Исп1 Исп2	5									 			
10	Составление пояснительной записки	Исп2	13												

*Примечание:*



– Исп. 1 (научный руководитель),  – Исп. 2 (инженер)

### 4.2.3 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением. В этой работе использовать следующую группировку затрат по следующим статьям:

- материальные затраты научно-исследовательской работы (НИР);
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы НИР.

#### 4.2.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

Материальные затраты — это затраты организации на приобретение сырья и материалов для создания готовой продукции.

Данная часть включает затрат всех материалов, используемых при получении образца, нанесенного с покрытием Zr-Y-O. Результаты расчета затрат представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Затраты на получение образца, нанесенного с покрытием Zr-Y-O

Наименование статей	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Итого затраты, руб.
Цирконий лист	кг	0,2	23500	4700
Порошок оксида иттрия	кг	0,1	6030	603
Аргоновый баллон	л	10	19,25	192,5
Кислород в баллоне	л	10	9	90
Кремний	шт.	1	520	520
Перчатки резиновые, технические	пар	1	12	12
Итого:				6117,5

#### 4.2.3.2 Расчет амортизации специального оборудования

Расчет сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и эксплуатировалось ранее, поэтому при расчете затрат на оборудовании учитываем только рабочие дни по данной теме.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации: рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (4.5)$$

где  $n$  – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m, \quad (4.6)$$

где  $I$  – итоговая сумма, тыс. руб.;  $m$  – время использования, мес.

Таблица 4.12 – Затраты на оборудование

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во ед.	Срок полезного использования, лет	Время использования, мес.	$H_A$ , %	Цена оборудования, руб.	Амортизация
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Вакуумная установка УВН-05МД «КВАНТ»	1	15	0,16	7	1300000	1213
2	РФА- установка ДРОН-3М	1	20	0,1	5	18000000	7500
3	Просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) JEM-2100F	1	20	0,16	5	18000000	12000
4	Нанотвердомер «NanoTest 600»	1	10	0,1	10	250000	208
Итого:		20921 руб.					

#### 4.2.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата  $З_{осн}$  одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p, \quad (4.7)$$

где  $З_{дн}$  – среднедневная заработная плата, руб.;  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн. (таблица 4.9).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_{\partial}} = \frac{51285 \cdot 10,3}{246} = 2147,3 \text{ руб.}, \quad (4.8)$$

где  $З_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $F_{\partial}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

– при отпуске в 28 раб. дня –  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная рабочая неделя;

– при отпуске в 56 раб. дней –  $M = 10,3$  месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_{\partial}} = \frac{33150 \cdot 11,2}{213} = 1743,1 \text{ руб.} \quad (4.9)$$

Должностной оклад работника за месяц:

– для руководителя:

$$З_m = З_{мс} \cdot (1 + k_{np} + k_{\partial}) k_p = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.} \quad (4.10)$$

– для инженера:

$$З_m = З_{мс} \cdot (1 + k_{np} + k_{\partial}) k_p = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.}, \quad (4.11)$$

где  $З_{мс}$  – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.;  $k_{np}$  – премиальный коэффициент, равен 0,3;  $k_{\partial}$  – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2;  $k_p$  – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 4.13 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	52/14	104/14
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	48/5	24/10
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Таблица 4.14 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$З_{мс}, руб$	$k_{пр}$	$k_{\partial}$	$k_p$	$З_{м}, руб$	$З_{\partialн}, руб$	$T_p, раб.дн.$	$З_{осн}, руб$
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2147,3	13,5	28988,6
Инженер	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1743,1	68,5	119402,4
Итого:								148391

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

– для руководителя:

$$З_{доп} = k_{доп} \cdot З_{осн} = 0,15 \cdot 28988,6 = 4348,3 \text{ руб.} \quad (4.12)$$

– для инженера:

$$З_{доп} = k_{доп} \cdot З_{осн} = 0,15 \cdot 119402,4 = 17910,4 \text{ руб.}, \quad (4.13)$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,15).

#### 4.2.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

– для руководителя:

$$З_{внеб} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (28988,6 + 4348,3) = 10001,1 \text{ руб.} \quad (4.14)$$

– для инженера:

$$З_{внеб} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (119402,4 + 17910,4) = 41193,8 \text{ руб.}, \quad (4.15)$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

#### 4.2.3.5 Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи и т.д. Сумма 5 статьи затрат, рассчитанных выше, приведена в таблице ниже и используются для расчета накладных расходов.

Таблица 4.15 – Группировка затрат по статьям

Статьи					
1	2	3	4	5	6
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов
20921	6117,5	148391	22258,7	51194,9	248883,1

Величина накладных расходов определяется по формуле (4.16):

$$З_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{np}, \quad (4.16)$$

где  $k_{np}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,2.

$$З_{накл} = 248883,1 \cdot 0,2 = 49776,6 \text{ руб.},$$

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НИ «Исследование структурно-фазового состояния и физикомеханических свойств защитных нанокompозитных покрытий системы Zr-Y-O на поверхности кремния» по форме, приведенной в таблице 4.16. В таблице также представлено определение бюджета затрат двух конкурирующих научно-исследовательских проектов.

Таблица 4.16 – Группировка затрат по статьям

№	Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
		Текущий Проект	Исп.2	Исп.3	
1	Материальные затраты НИР	6117,5	4626,3	15945	Пункт 4.2.3.1
2	Затраты на специальное оборудование	20921	22959,8	43453	Пункт 4.2.3.2

3	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	148391	148391	148391	Пункт 4.2.3.3
4	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	22258,7	22258,7	22258,7	Пункт 4.2.3.3
5	Отчисления во внебюджетные фонды	51194,9	51194,9	51194,9	Пункт 4.2.3.4
6	Накладные расходы	49776,6	49776,6	49776,6	Пункт 4.2.3.5
Бюджет затрат НИР		298659,7	299177,3	331019,2	Сумма ст. 1- 6

#### **4.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования**

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

**Интегральный показатель финансовой эффективности** научного исследования получен в процессе оценки бюджета затрат трех вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принят за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве аналогов данной НИР рассмотрены:

1) Просветляющие покрытия на основе CVD алмаза для германиевой ИК-оптики;

2) Композиционные материалы на основе ZrC-BN, структура и свойства.

Интегральный финансовый показатель разработки рассчитывается как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (4.17)$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения.

$\Phi_{\text{текущ.проект}} = 298659,7$  руб,  $\Phi_{\text{исп.1}} = 299177,3$  руб,  $\Phi_{\text{исп.2}} = 331019,2$  руб.

$$I_{\text{финр}}^{\text{тек.пр.}} = \frac{\Phi_{\text{тек.пр.}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{298659,7}{331019,2} = 0,90;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}} = \frac{\Phi_{\text{исп.2}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{299177,3}{331019,2} = 0,91;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.3}} = \frac{\Phi_{\text{исп.3}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{331019,2}{331019,2} = 1.$$

В результате расчета консолидированных финансовых показателей по трем вариантам разработки вариант 1 (текущий проект) с меньшим перевесом признан считается более приемлемым с точки зрения финансовой эффективности.

**Интегральный показатель ресурсоэффективности** вариантов выполнения НИР (  $I_{pi}$  ) определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 4.17).

Таблица 4.17 – Сравнительная оценка характеристик вариантов НИР

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1. Безопасность при использовании установки	0,15	4	4	4
2. Стабильность работы	0,2	4	4	5
3. Технические характеристики	0,2	5	3	4
4. Механические свойства	0,3	5	4	3
5. Материалоёмкость	0,15	5	4	5
ИТОГО	1	4,65	3,8	4,05



Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,3 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 = 4,65;$$

$$I_{p2} = 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 3 + 0,3 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 = 3,80;$$

$$I_{p3} = 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 + 0,3 \cdot 3 + 0,15 \cdot 5 = 4,05.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки вычисляется на основании показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр.i}}. \quad (20)$$

$$I_{исп.1} = \frac{4,65}{0,90} = 5,18, \quad I_{исп.2} = \frac{3,8}{0,91} = 4,18, \quad I_{исп.3} = \frac{4,05}{1} = 4,05.$$

Далее интегральные показатели эффективности каждого варианта НИР сравнивались с интегральными показателями эффективности других вариантов с целью определения сравнительной эффективности проекта (таблица 4.18).

Таблица 4.18 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,90	0,91	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,65	3,8	4,05
3	Интегральный показатель эффективности	5,18	4,18	4,05
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,81	0,78

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансово- и ресурсоэффективным является вариант 1 (текущий проект). Наш проект является более эффективным по сравнению с конкурентами.

## **Выводы по разделу**

В результате выполнения целей раздела можно сделать следующие выводы:

1. Результатом анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации НИР как наиболее подходящего и оптимального по сравнению с другими.

2. В ходе планирования для руководителя и инженера был разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей. Определено следующее: общее количество дней для выполнения работ составляет 102 дней; общее количество дней, в течение которых работал инженер, составляет 98 дней; общее количество дней, в течение которых работал руководитель, составляет 20 дней;

3. Для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, который составляет 298659,7 руб.;

4. Результат оценки эффективности ИР показывает следующие выводы:

1) значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,90, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной по сравнению с аналогами;

2) значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,65, по сравнению с 3,8 и 4,05;

3) значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 5,18, по сравнению с 4,18 и 4,05, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

## **5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

Объектом исследования является покрытие на основе Zr-Y-O. Исследование выполнялось в лаборатории Национального исследовательского Томского политехнического университета (ауд. 018, 021 10 корпуса), оснащённой оборудованием для проведения исследований в области материаловедения и технологии материалов.

С целью оценки степени безопасности разработки и применения нанокompозитных покрытий на основе Zr-Y-O в данном разделе ВКР необходимо рассмотреть правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности; основные потенциальные вредные и опасные факторы и способы снижения их воздействия; экологическую безопасность научного проекта, а также вопросы безопасности в чрезвычайных ситуациях.

### **5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

#### **5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя)**

##### **правовые нормы трудового законодательства**

Организации обязаны соблюдать требования трудового кодекса Российской Федерации от 30. 12. 200 № 197-ФЗ [25].

Некоторые виды деятельности в нанотехнологических лабораториях относятся к видам работ в тяжёлых и вредных условиях. Гарантии и компенсации для таких работников заключаются в:

- повышенной оплате труда;
- сокращённой продолжительности рабочего времени;
- дополнительном оплачиваемом отпуске;
- обеспечении лечебно-профилактическим питанием;
- досрочном назначении трудовой пенсии.

Компенсации и гарантии регламентируются трудовым кодексом Российской Федерации [25], локальными нормативными актами, коллективным договором, трудовым договором.

### 5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рабочее место располагается на цокольном этаже в учебном корпусе Национального исследовательского Томского политехнического университета, лаборатория представляет собой комнату размером 8 м на 5 м, высотой 3.2 м, в лаборатории находится 2 окна (с видимым светом), постоянно 4 человека.

При проведении лабораторных работ работник лаборатории находится в положении стоя или сидя. Следовательно, при организации рабочего места лаборанта требуется соблюдение нормативов ГОСТ 12.2.032-78 [26] и ГОСТ 12.2.033-78 [27].

Лаборатория оснащена отоплением и вентиляцией или кондиционером. Для отделки помещений используют диффузно-отражающие материалы. Поверхность пола соответствует следующим требованиям: ровность, удобство для очистки, наличие антистатических свойств, отсутствие выбоин. В помещении держат аптечку первой медицинской помощи и огнетушитель.

Расположение рабочего стола обеспечивает удобство работы за ним и даёт возможность осмотра, а также ремонта находящегося на нём оборудования.

## 5.2 Производственная безопасность

Исследование выполнялось в лаборатории Томского политехнического университета (ауд. 018, 021 10 корпуса). Для проведения исследования применяли низкоскоростную пилу, ультразвуковую ванну и т. д.

Для идентификации потенциальных факторов использован ГОСТ 12.0.003-2015 [28]. Перечень выявленных возможных опасных и вредных факторов представлен в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработ ка	Изготовл ение	Эксплуат ация	
1. Превышение уровня шума		+		ГОСТ 12.1.003-2014 [29] ГОСТ 12.1.029-80 [30]

				СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [31]
2. Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548-96 [32] ГОСТ 12.1.005-88 [33]
3. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	ГОСТ 12.1.019-2017 [34] ГОСТ 12.1.038-82 [35]
4. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [36] СП 52.13330.2016 [37]
5. Чрезмерное загрязнение воздушной среды в зоне дыхания		+		СанПиН 2.2.4.548-96 [32] ГОСТ 12.1.005-88 [33] ГН 2.2.5.3532-18 [38] ГОСТ 12.1.007-76 [39] ГОСТ 12.4.011-89 [40]

## 5.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

### 5.2.1.1 Анализ показателей шума

Допустимые уровни шума установлены в ГОСТ 12.1.003-2014 [29] и в СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [31] и представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Предельно допустимые уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах для трудовой деятельности разных категорий тяжести и напряжённости, в дБА

Категория напряжённости трудового процесса	Категория тяжести трудового процесса				
	лёгкая физическая нагрузка	средняя физическая нагрузка	тяжёлый труд 1 степени	тяжёлый труд 2 степени	тяжёлый труд 3 степени
Напряжённость легкой степени	80	80	75	75	75
Напряжённость средней степени	70	70	65	65	65
Напряжённый труд 1 степени	60	60	-	-	-
Напряжённый труд 2 степени	50	50	-	-	-

Работа инженера в лаборатории относится к категории работ с лёгкой степенью напряжённости и с лёгкой физической нагрузкой. Для рабочих мест таких работников предельно допустимый уровень шума составляет 80 дБА.

Длительное влияние шума приводит к подавлению психического состояния, к повышенной утомляемости и расстройству центральной нервной системы.

Показатели уровня шума в лаборатории соответствуют нормативам. В случае превышения норм по шуму необходимо принимать меры по снижению уровня шума и защите работников от его воздействия в соответствии с [30], используя в том числе такие меры, как:

- звукоизолирующие и звукопоглощающие элементы оборудования;
- рациональное планирование режима труда и размещение оборудования.

### 5.2.1.2 Анализ показателей микроклимата

Под показателями микроклимата понимают температуру и относительную влажность воздуха, скорость движения воздуха и интенсивность теплового излучения.

В таблице 5.3 обозначены оптимальные и допустимые показатели микроклимата в рабочей зоне производственного помещения для категории работ «Лёгкая Ia» по ГОСТ 12.1.005-88 [33].

Таблица 5.3 – Требования к микроклимату помещения для категории работ «Лёгкая Ia»

Период года	Температура, °C					Относительная влажность, %		Скорость движения, м/с	
	оптимальная	допустимая				оптимальная	допустимая на рабочих местах постоянных и непостоянных, не более	оптимальная, не более	допустимая на рабочих местах постоянных и непостоянных
		верхняя граница		нижняя граница					
		на рабочих местах							
		постоянных	непостоянных	постоянных	непостоянных				
Холодный	22-24	25	26	21	18	40-60	75	0,1	Не более 0,1
Теплый	23-25	28	30	22	20	40-60	55 (при 28°C)	0,1	0,1-0,2

Исследовательская лаборатория располагается в подвале, в комнате нет больших окон. В такой комнате существует опасность, что скорость движения воздуха недостаточна, и исследователи не могут работать в этой среде в течение длительного периода времени.

Чтобы обеспечить требуемые показатели микроклимата, следует измерять показатели микроклимата на основании требований, обозначенных в СанПиН 2.2.4.548-96 [32]. Регулярно должно осуществляться проветривание помещений, необходимо контролировать температуру воздуха в помещении и скорость движения воздушного потока.

Требования к воздуху рабочей зоны определены в ГОСТ 12.1.005-88 [33], указывающем допустимое содержание в воздухе рабочей зоны вредных веществ.

Требуется регулярный контроль содержания вредных веществ в воздухе. В ходе выполнения данной ВКР в лаборатории используются порошки  $ZrO_2$  и  $Y_2O_3$ . Данные вещества относятся к четвертому классу опасности – малоопасные вещества [39], их ПДК –  $2\text{мг/м}^3$  [38]. Если ПДК превышена, у работников лаборатории могут возникнуть такие осложнения, как головокружение, раздражение глаз и нарушение памяти.

В организациях, где используются вредные вещества, необходимо выполнять санитарно-гигиенические, медико-биологические и организационно-технические мероприятия:

- соблюдение герметичности оборудования;
- применение качественных аспирационных систем (вентиляции);
- регулярная уборка помещений;
- контроль содержания вредных веществ на рабочем месте [40].

### 5.2.1.3 Анализ электробезопасности

Электрический ток считается одним из повышенных источников опасности. В таблице 5.4 обозначены предельно допустимые значения электрического тока при неаварийном режиме работы электрооборудования.

Таблица 5.4 – Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов

Род тока	$U$ , В	$I$ , мА
	не более	
Переменный, 50 Гц	2,0	0,3
Переменный, 400 Гц	3,0	0,4

Постоянный	8,0	1,0
------------	-----	-----

При анализе электробезопасности необходимо классифицировать помещение по уровню опасности поражения электрическим током, категория опасности поражения электрическим током относится к Помещениям повышенной опасности поражения электрическим током.

Таблица 5.5 – Классификация помещений по опасности поражения электрическим током

Категория помещения	Критерии оценки опасности поражения электрическим током
Особо опасные помещения	Существует один из следующих признаков: - присутствие химически активных сред; - постоянная влажность 100% (особенно во сырых помещениях); - наличие более двух факторов, которые увеличивают предпосылку опасности.
Помещения повышенной опасности поражения электрическим током	Присутствует один из следующих факторов: - повышенная температура воздуха (более + 35 °С); - повышенная влажность (более 75 %); - наличие токопроводящей пыли; - наличие токопроводящих полов; - возможности прикосновения одновременно и к электроустановке, и к заземлению или к двум электроустановкам одновременно.
Мало опасные помещения	Помещения в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность.

В качестве основных источников поражения электрическим током выделяют повреждённую проводку, розетку, выключатель и открытые металлические участки электроприборов.

Основные причины воздействия тока на человека:

1) появление напряжения вследствие ошибочного включения оборудования; 2) появление напряжения в результате повреждения изоляции; 3) напряжение на поверхности в результате замыкания провода на этой поверхности.

Электрический ток вызывает у человека негативные термические реакции (ожоги, функциональное расстройство органов в результате их нагрева), электролитические реакции (разложение органических жидкостей), механические реакции (разрыв, расслоение тканей организма) и биологические реакции (непроизвольные сокращения мышц, приводящие к нарушению деятельности органов дыхания и кровообращения).

К электробезопасности относятся технические и организационные средства и мероприятия, позволяющие обеспечить защиту людей от



воздействия тока. Для обеспечения электробезопасности используются: защитные оболочки, диэлектрические перчатки, изолирующие подставки, заземление и др. [34].

#### 5.2.1.4 Анализ освещенности рабочей зоны

Нормы освещения научно-технических лабораторий, в том числе физических, стилOMETрических, спектрографических и т. п., по [36] представлены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещённого освещения научно-технических лабораторий

Рабочая поверхно сть и  плоскость нормиров ания КЕО и освещённ ости (Г – горизонта льная, В – вертикаль ная) и высота плоскости над полом, м	Естественное освещение КЕО $e_n$ , %		Совмещённое освещение КЕО $e_n$ , %		Искусственное освещение				
	при верхнем или комбиниро ванном освещении	при боково м освещ ении	при верхнем или комбиниро ванном освещении	при боково м освещ ении	Освещённость, лк		Показат ель диском форта, М, не более	Коэффиц иент пульсаци и освещён ности, КЕО $e_n$ , %, не более	
					при комбиниро ванном освещении	при общем освещ ении			
									все го
Г-0.8	3.5	1.2	2.1	0.7	500	300	400	40	10

Работа по изучению свойств нанокomпонентных покрытий относится к зрительным работам средней точности ( $IV_{\Gamma}$  разряд).

Нормы разных видов освещения для промышленных помещений со зрительными работами четвертого разряда [37] представлены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Требования к освещению помещений промышленных предприятий (для категории  $IV_{\Gamma}$ )

Искусственное освещение				
Освещённость, лк			Сочетание нормируемых величин объединённого показателя дискомфорта UGR и коэффициента пульсации	
при системе комбинированного освещения		при системе общего освещения	UGR, не более	Кп, %, не более
Всего	В том числе от общего			

-	-	200	25	20
---	---	-----	----	----

Малая освещённость может стать причиной появления астигматизма, близорукости и т. п., ухудшения сна и утомляемости организма.

Для правильного освещения в лаборатории необходимо, верно, выбирать вид освещения, количество и расположение ламп, тип осветительных приборов. Лаборатория должна быть освещена верхним общим освещением.

### ***Расчет освещенности помещения***

Помещение с размерами: длина  $A = 8$  м, ширина  $B = 5$  м, высота  $H = 3.2$  м. Высота рабочей поверхности  $h_{pn} = 0,8$  м. По нормам освещения и отраслевым нормам освещения в помещении при работе с ПК рекомендуется 300 - 500 лк при общем освещении.

Определим количество светильников, необходимое для освещения лаборатории при  $E = 300$  лк. Общее освещение осуществляется светильниками ARS/R. Оптическая часть светильника ARS/R включает в себя экранирующую решетку, которая выполнена из зеркального алюминия и монтируются к корпусу посредством скрытых пружин. В одном светильнике 4 ЛЛ мощностью по 17 Вт.

- Световой поток лампы  $\Phi_{\lambda} = 1425$  лм.
- Коэффициент отражения стен  $R_c = 50$  %, потолка  $R_n = 70$  %.
- Коэффициент запаса  $K_z = 1,5$ .

Высота светильника над рабочей поверхностью  $h$ , м, определяется по формуле:

$$h = H - h_c - h_{pn} = 3,2 - 0,8 = 2,4, \quad (5.1)$$

где  $h_c$  – расстояние от светильника до потолка, м (при высоте помещения менее пяти метров принимается равной 0 м);  $h_p$  – высота рабочей поверхности над уровнем пола, м (принимается равной 0,8 м).

Определим индекс помещения по формуле:

$$I = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{5 \cdot 8}{2,4 \cdot (5 + 8)} = 1,28 \quad (5.2)$$

Коэффициент использования светового потока:  $U = 0,54$ . При расчете числа необходимых светильников используем метод светового потока. Их количество рассчитывается по следующей формуле:

$$N = \frac{E \cdot S \cdot K_z}{U \cdot n \cdot \Phi_l} = \frac{300 \cdot 40 \cdot 1,5}{0,54 \cdot 4 \cdot 1425} \approx 6, \quad (5.3)$$

где  $E$  – требуемая горизонтальная освещенность, лк;  $S$  – площадь освещаемого помещения, м<sup>2</sup>;  $K_z$  – коэффициент запаса;  $U$  – коэффициент использования;  $\Phi_l$  – световой поток одной лампы, лм;

Таким образом, количество светильников ARS/R, необходимое для освещения лаборатории при  $E = 300$  лк равно 6.

Для нашего помещения необходимо общее количество светового потока:

$$\Phi_{об} = \Phi_l \cdot N = 1425 \cdot 6 = 8550 \text{ лм.}$$

Используемое в лаборатории освещение обеспечивает достаточную освещённость рабочей поверхности, освещённость стабильная, без блёскости и без теней.

Если необходимо выполнять более тонкие зрительные работы, применяется имеющееся в лаборатории дополнительное местное освещение (светильники, настольные лампы). Специальное оборудование для лабораторных исследований (микроскоп, дифрактометр) снабжено встроенными осветительными приборами.

### 5.2.1.5 Анализ пожарной безопасности

Пожар – это одна из наиболее распространённых опасных ситуаций в лаборатории, на которую должны обращать большое внимание. Помещения могут быть классифицированы в зависимости от степени взрыва и пожароопасности, их критерии оценки представлены в таблице 5.8.

Таблица 5.8 – Классификация помещений по степени пожарной опасности

Категория помещения	Характеристика веществ и материалов, находящихся (обращающихся) в помещении
А Взрыво-пожароопасная	-Горючие газы, легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки не более +28°C в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные парогазовоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа. -Вещества и материалы, способные взрываться и гореть при взаимодействии с водой,

	кислородом воздуха или друг с другом в таком количестве, что расчетное избыточное давление взрыва в помещении превышает 5 кПа
Б Взрыво-пожароопасная	Горючие пыли или волокна, легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки более + 28°C, горючие жидкости в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные пылевоздушные или паровоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа
В1 – В4 пожароопасные	Горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых они имеются в наличии или обращаются, не относятся к категориям А или Б.

Таблица 5.9 – Определение категории В1-В4 осуществляется по значению удельной пожарной нагрузки

Категория помещения	Удельная пожарная нагрузка $g$ на участке, МДж·м <sup>-2</sup>	
В1	Более 2200	Удельная пожарная нагрузка определяется как соотношение общей пожарной нагрузки (произведения количества и низшей теплоты сгорания вещества) на площадь ее размещения. При наличии различных горючих веществ и материалов в помещении общая пожарная нагрузка определяется как сумма произведений количества и низшей теплоты сгорания каждого вида вещества.
В2	1401 — 2200	
В3	181 — 1400	
В4	1 — 180	

Помещение лаборатории по степени взрыва и пожароопасности относится к категории В2, т. к. в нём присутствует выделение пыли и волокон во взвешенном состоянии [41].

К пожару могут приводить следующие причины: неосторожное обращение с огнем; оставленные без присмотра нагревательные приборы ; самовоспламенение и самовозгорание веществ; электрическая дуга и т. п.

Чтобы предотвратить пожар в лаборатории, требуется соблюдение правильного теплового и электрического режима работы оборудования. Все сотрудники лаборатории должны знать необходимые правила пожарной безопасности. Средства для тушения пожара необходимо содержать в должном состоянии на видном месте (Рис 5.1).

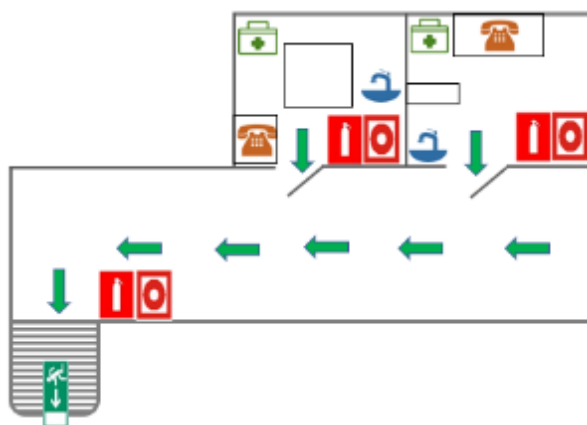


Рисунок 5.1 План эвакуации

Если в лаборатории возник пожар, то после ликвидации пожара формируют комиссию, определяющую возможность дальнейшего использования лабораторного оборудования, которое проверяют на соответствие требованиям пожарной безопасности. При отсутствии повреждений возможно продолжение работ [42].

### 5.3 Экологическая безопасность

Эксперимент по изучению свойств нанокomпонентных покрытий на основе Zr-Y-O включает распыление  $ZrO_2$  на поверхности подложки Si в атмосфере Ar и  $O_2$ . Одним из потенциальных опасных факторов для воздуха при приготовлении образцов из кремния с покрытием оксидом циркония может быть распространение порошка  $ZrO_2$  в воздушной среде. Средствами защиты являются очистка вредных выбросов в специальных аппаратах (циклоны, фильтры и т. п.) и рассеивание очищенных выбросов в воздухе. Выбросы порошка, появляющиеся при проведении исследования, не превышают ПДК [43].

Для проведения исследования применяются пила и шлифовальная установка, в ходе работы которых с целью понижения температуры образца используется вода. При этом вредные вещества могут попадать в почву и в воду. Большое количество вредных веществ в воде вредно для людей, животных и растений. Количество отходов, попадающих при исследовании в воду, не превышает ПДК [44].

В процессе проведения исследования образуются твёрдые отходы: наждачная бумага и образцы. Попадание порошковых материалов в почву может стать причиной изменения её состава, что отрицательно влияет на находящиеся там живые организмы. Утилизация вредных твёрдых отходов должна осуществляться в соответствии с действующим законодательством.

Таким образом, проведение исследования безопасно для атмосферы, гидросферы и литосферы.

#### **5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Чрезвычайные ситуации являются опасными событиями или явлениями, нарушающими безопасность жизнедеятельности.

Выделяют два вида основных причин возникновения чрезвычайных ситуаций:

- 1) внешние – стихийные бедствия, сильные морозы зимой, неожиданное прекращение подачи электроэнергии, воды, технологических продуктов и т. д.;
- 2) внутренние – сложность технологий, недостаточная квалификация персонала, проектно-конструкторские недоработки, физический и моральный износ оборудования, низкая трудовая и технологическая дисциплина и т. п.

Поскольку в области, где расположена исследовательская лаборатория, зимой бывает сильный мороз, из-за этого может привести к внезапному прекращению работы экспериментального оборудования. В такой аварийной ситуации вызывают технические проблемы, такие как короткое замыкание в цепи, и даже приведут к взрыву или пожару.

Для решения таких проблем лаборатория должна быть оснащена системой отопления или кондиционирования для контроля температуры в помещении, чтобы поддерживать нормальную работу экспериментального оборудования. Следует регулярная проверка работы контроля температуры.

В лаборатории наиболее вероятно возникновение чрезвычайных ситуаций техногенного характера. На случай возникновения чрезвычайной

ситуации на предприятии должен быть предусмотрен следующий комплекс мероприятий:

- 1) необходимо эвакуировать людей или укрыть их в защитных сооружениях;
- 2) обеспечить людей индивидуальными средствами защиты;
- 3) организовать медицинскую помощь пострадавшим.

### **Выводы по разделу**

В результате проведенных исследований в рамках раздела «Социальная ответственность» были изучены правовые нормы трудового законодательства при проведении исследования по изучению ударопрочных защитных покрытий на основе Zr-Y-O.

Также проанализированы основные вредные и опасные факторы, которые могут возникать в процессе исследований в лаборатории, при разработке и эксплуатации проекта, как: показателей микроклимата, уровень шума, освещенность рабочей зоны, значения опасности электрической цепи, потенциальные опасности пожара. Были описаны мероприятия по снижению уровней воздействия данных факторов.

Рассмотрен характер воздействия проектируемого решения на окружающую среду. В процессе выполнения исследования было выявлено, то что микропорошок и отходы, полученные в ходе исследований не оказывали влияние на гидросферу и литосферу. Во избежание загрязнения окружающей среды отходы утилизировались в строгом соответствии с соответствующими документами.

Проанализированы природные и технические чрезвычайные ситуации, которые могут возникнуть в лаборатории. Для предотвращения чрезвычайных ситуаций были разработаны превентивные меры, а также разработаны процедуры для обработки чрезвычайных ситуаций.

Таким образом, при проведении лабораторных исследования могут применяться требования и меры, указанные в работе, а также порядок действий при чрезвычайных ситуациях также может быть задействован на производстве.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований микроструктуры, фазового состава и физико-механических свойств защитных покрытий системы Zr-Y-O толщиной 3 мкм и 6 мкм, сформированных в условиях импульсного магнетронного осаждения на поверхность монокристаллического кремния, были получены следующие результаты:

1. По данным РФА и ПЭМ установлено, что формируемые в условиях импульсного магнетронного осаждения защитные покрытия обладают мелкокристаллической столбчатой структурой. При этом формируемые столбцы простираются в направлении роста защитных покрытий по всей их толщине. Средний поперечный размер кристаллитов для покрытий системы Zr-Y-O толщиной 3 мкм по мере удаления от кремниевой подложки увеличивается от  $46\pm 7$  до  $180\pm 15$  нм.

2. Исследование оптических свойств показало, что наибольший коэффициент светопропускания  $\sim 75\%$  в видимой области спектра характерен для образцов с покрытием системы Zr-Y-O толщиной 3 мкм, в то время как коэффициент светопропускания образцов с покрытием Zr-Y-O толщиной 6 мкм не превышает 60 %.

3. При оценке параметров механических свойств установлено, что нанесение защитных покрытий системы Zr-Y-O позволяет увеличить микротвердость и трещиностойкость образцов монокристаллического кремния. Однако для использования в качестве защитных противоударных покрытий наиболее перспективным является покрытие системы Zr-Y-O толщиной 3 мкм, так как нанесение указанных защитных покрытий на поверхность монокристаллического кремния позволяет повысить его трещиностойкость в 3 раза по сравнению с исходными образцами.

4. Результаты лабораторных ударных испытаний показали, что после нанесения защитных покрытий системы Zr-Y-O толщиной 3 мкм процесс эрозии поверхности кремния протекает менее интенсивно, так как данные

покрытия позволяют уменьшить поверхностную плотность кратеров в 3,7 раза по сравнению с исходными образцами кремния. Защитные покрытия Zr-Y-O толщиной 6 мкм позволяют снизить поверхностную плотность кратеров относительно исходного кремния лишь в 2,7 раза, а также имеют тенденцию к отслаиванию их от кремниевой подложки в процессе их бомбардировки потоком твердых микрочастиц Fe.

5. В разделе «Финансовый менеджмент» проведен SWOT анализ научного исследования. Для лучшего планирования проведения работ и реализации труда исполнителей была построена ленточная диаграмма Ганта. Бюджет научно-технического исследования составляет 298659,7 руб., данный НИР является наиболее эффективным вариантом исполнения по сравнению с аналогами.

6. В результате раздела «Социальная ответственность» были проанализированы основные вредные и опасные факторы, которые могут возникать в процессе исследований в лаборатории, при разработке и эксплуатации проекта. Также проанализированы природные и технические чрезвычайные ситуации, которые могут возникнуть в лаборатории. Для предотвращения чрезвычайных ситуаций были разработаны превентивные меры, а также разработаны процедуры для обработки чрезвычайных ситуаций.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Новиков Л. С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты: Учебное пособие. – М.: Университетская книга, 2009. – 104 с.
2. Schonberg W. P. Protecting spacecraft against orbital debris impact damage using composite materials // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing Vol. 31, 2000, 869-878.
3. Акишин А. И. Космическое материаловедение: Методическое и учебное пособие. – М: НИИЯФ МГУ, 2007. – 209 с.
4. Moussi A., Drolshagen G., McDonnell J.A.M., Mandeville J.-C., Kearsley A.T., Ludwig H. Hypervelocity impacts on HST solar arrays and the debris and meteoroid population // Advances in Space Research. – 2005. – V. 35. № 7. – P. 1243-1253
5. Silverman, E. M., Space Environmental Effects on Spacecraft: LEO Materials Selection Guide, NASA Contractor Report 4661, Part 1, August 1995.
6. Whipple F.L. Meteorites and space travel // Astronomical Journal, 52 (1947), p. 137.
7. Патент № 258641 РФ. Защитное покрытие космического аппарата от механических воздействий, способ создания защитного покрытия космического аппарата от механических воздействий и устройство для создания такого покрытия в космосе В64G 1/52 / И.Н. Глухих, В.Ф. Челябин; ОАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королева» № 2003133632/11, Заявл. 18.11.2003 г.; Опубл. 20.08.2005 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2258641>
8. Кулебякин А. В. Синтез, структура и свойства кристаллов  $ZrO_2$  частично стабилизированных  $Y_2O_3$ : дис. канд. техн. наук. – М., 2009. – 164 с.
9. Керамические материалы на основе диоксида циркония / Жигачев А.О., Головин Ю.И., Умрихин А.В., и др. Под общей редакцией Ю.И. Головина. – М.: Техносфера, 2018. – 358 с.

- 
10. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник в 3-х томах. / Под общ. Ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 2001. – Кн. 3 Т. 1. – 872 с.
  11. Rahaman M.N. Yao F. Ceramics for prosthetic hip and knee joint replacement // J. Am. Ceram. Soc. – 2007. – V. 90. – № 7. – P. 1965-1988.
  12. Kelly P.M. Francics Rose L.R. The martensitic transformation in ceramics – its role in transformation toughening // Progress in Materials Science. – 2002. – V. 47. – P. 462-557.
  13. Chevalier J., Gremillard L., Virkar A.V. et. al. The tetragonal-monoclinic transformation in zirconia: lessons learned and future trends // J. Am. Ceram. Soc. – 2009. – V. 92. – № 9. – P. 1901-1920.
  - 14 . Сергеев В.П., Яновский В.П., Параев Ю.Н., и др. Установка ионно-магнетронного напыления нанокристаллических покрытий (КВАНТ) // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. Спец. выпуск. ч. 2. С. 333-336.
  - 15 . Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: Металлургия, 1994.
  16. Garvie R.C., Nicholson P.S. Phase Analysis in Zirconia Systems // J. Amer. Ceram. Soc. – 1972. – V. 55, – № 6. – P. 303-305
  17. Williamson G. Hall W. X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram // Acta Metallurgica – 1953. – Т. 1 – № 1 – С. 22–31.
  18. Томас Г., Гориндж М.Дж. // Просвечивающая электронная микроскопия материалов – Москва: Изд-во «Наука», 1983. – 320с.
  19. Lawn B.R., Evans A.G., and Marshall D.B. Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Median/Radial Crack System // J. Am. Ceram. Soc. 1980. V. 63, P. 574-581.
  - 20 . Усеинов А., Кравчук К. Маслеников И. Индентирование. Измерение твердости и трещиностойкости покрытий // Наноиндустрия. 2013. № 7. С. 48-56

- 
21. Anstis G. R., Chantikul P., Lawn, B. R. and Marshall D. B. A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness – I. Direct crack measurements. // J. Am. Ceram. Soc. 1981. V. 64. P. 533–538.
22. Герасимов А.В., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф. // Защита космических аппаратов от техногенных и естественных осколков. Эксперимент и численное моделирование // Вестник ТГУ. Математика и механика. – 2011. – Т. 16. – № 4. – С. 70-78.
23. Стенд для исследования высокоскоростного соударения мелких частиц с преградой МПК F41F1/00: патент Рос. Федерация № 2610790; заявл. 23.10.2015; опубл. 15.02.2017, Бюл. №5.
24. Gerasimov A.V., Kalashnikov M.P., Sergeev V.P. et al. // Complex research on the interaction of glass with space debris // AIP Conference Proceedings. – 2015. – V. 1683. – P. 020055.
25. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 02.12.2019).
26. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования (дата введения: 01.01.1979).
27. ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования (дата введения: 01.01.1979).
28. ГОСТ 12.0.003-2015. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (дата введения: 01.03.2017).
29. ГОСТ 12.1.003-2014. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности (дата введения: 01.11.2015).
30. ГОСТ 12.1.029-80. ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация (дата введения: 01.07.1981).
31. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки (утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 31 октября 1996 г.).

- 
- 32 . СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений (утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 1 октября 1996 г.).
33. ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (дата введения: 01.01.1989).
34. ГОСТ 12.1.019-2017. ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты (дата введения: 01.01.2019).
35. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов (дата введения: 01.07.1983).
36. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий (дата введения: 15.06.2003).
- 37 . СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\* (дата введения: 08.05.2017).
38. ГН 2.2.5.3532-18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 13.02.2018 № 25).
39. ГОСТ 12.1.007-76. ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности (дата введения: 01.01.1977).
40. ГОСТ 12.4.011-89. ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация (дата введения: 01.07.1990).
- 41 . Федеральный закон «О внесении изменений в Федеральный закон "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности"» от 10.07.2012 № 117-ФЗ.
42. ВНЭ 5-79. Правила пожарной безопасности при эксплуатации предприятий химической промышленности (утв. Министерством химической промышленности 25 июля 1979 г.).

---

43 . ГН 2.1.6.3492-17. Предельно-допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений (утв. 22.12.2017, с изменениями на 31.05.2018).

44. ГН 2.1.5.1315-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (утв. 30.04.2003, с изменениями на 13.07.2017).